

FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · K. Bengler ·
M. vom Stein · V. Knott

Einsatz der Augmented-Reality-
Technologie zur Unterstützung des
Fahrers von Flurförderzeugen

Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

***Einsatz der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von
Flurförderzeugen***

der Forschungsstellen

Technische Universität München, Institut für Maschinen- und Fahrzeutechnik,
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)

und

Technische Universität München, Institut für Produktionstechnik, Lehrstuhl für Ergonomie (LfE)

Das IGF-Vorhaben 446 ZN der Forschungsvereinigung Intralogistik/Fördertechnik und
Logistiksysteme e.V. – IFL wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik,

Printed in Germany 2015

ISBN: 978-3-941702-53-0

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Boltzmannstr. 15

85748 Garching

Tel.: + 49.89.289.15955

Fax: + 49.89.289.15922

www.fml.mw.tum.de

Augmented Reality im Flurförderzeug

Vorhaben Nr. 446 ZN

Einsatz der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen

Abschlussbericht

Kurzfassung:

Die Informationsbereitstellung für den operativen Mitarbeiter in der Intralogistik nimmt einen immer größer werdenden Stellenwert ein, um Prozesse und Arbeitsvorgänge effizient zu gestalten. Im vorliegenden Forschungsprojekt wird das Potenzial einer Informationsdarstellung direkt im Sichtbereich des Fahrers von Flurförderzeugen untersucht. Da diese Darstellung Bezug zur Lagerumgebung und zum Arbeitsablauf nimmt, also kontextbasiert realisiert ist, wird sie der Augmented-Reality-Technologie zugeordnet.

Als Forschungsobjekt wird hierbei der Gegengewichtsgabelstapler ausgewählt, weil dieser in einem breiten Anwendungsspektrum eingesetzt werden kann und durch die Fahrerkabine eine definierte Umgebung mit genügend Bauraum für das zu entwickelnde Anzeigekonzept gegeben ist.

Nach Beobachtung und Analyse der Arbeit mit Gegengewichtsgabelstaplern in Lager- und Produktionsstätten wird basierend darauf ein Einsatzszenario entwickelt, bei welchem dem Fahrer während des Lasthandlings assistiert wird. In diesem Szenario werden dem Fahrer die Position und die Lage der Gabelzinken bzw. des Hubmastes visualisiert sowie Anweisungen zum Bedienvorgang gegeben. Davon ausgehend leiten sich Anforderungen an das Gesamtsystem ab, welche die Erfassung der geometrischen Zustandsparameter der Gabelzinken und des Hubmastes beinhalten. Weitere Anforderungen werden aus Sicht der Ergonomie bestimmt, um eine optimale Informationsaufnahme durch den Gabelstaplerfahrer zu ermöglichen. Beruhend darauf werden sowohl ein technisches als auch ein ergonomisches Konzept für das Augmented-Reality-gestützte Assistenzsystem entwickelt. Als Anzeige wird eine Technologie ausgewählt, welche die Frontscheibe zu einem transparenten Display erweitert. Die Zusammenführung und Umsetzung der beiden Konzepte erfolgt in einem 2,5t-Elektro-Gegengewichtsgabelstapler als Demonstrator. Eine Evaluierung wird im Rahmen einer Versuchsreihe in Kooperation des Lehrstuhls fml und des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt. Mehrere Probanden absolvieren dazu mit dem Demonstrator eine Teststrecke in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml, in welche mehrere Lasthandlingvorgänge integriert sind. Die ermittelten Aufgabenbearbeitungsdauern mit Systemunterstützung sind im Vergleich zu den Dauern ohne Assistenz geringfügig erhöht. Eine höhere Genauigkeit bei der Bearbeitung kann jedoch nachgewiesen werden.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
1 Management Report	1
2 Einleitung	3
2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
2.2 Forschungsziel	5
2.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse	5
2.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse	5
2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels	6
2.3.1 Festlegung auf Gegengewichtsgabelstapler als Forschungsgegenstand	6
2.3.2 Lösungsweg und Arbeitspakete	7
3 Stand der Technik und der Wissenschaft	11
3.1 Augmented Reality	11
3.1.1 Begriffsdefinition	11
3.1.2 Begriffsabgrenzung	12
3.1.3 Komponenten eines AR-Systems	13
3.2 AR-Anwendung in Fahrzeugen	16
3.2.1 Funktionsweise eines Head-up Displays (HUD) im Automobil	16
3.2.2 Kontaktanaloges Head-up Display	17
3.3 Informationsbereitstellung im Gabelstapler	18
3.3.1 Serienmäßige Anzeigeelemente	18
3.3.2 Anzeigen von Staplerleitsystemen und Kamerasystemen	20
3.3.3 Sichtverhältnisse im Gabelstapler	21
3.4 Assistenzsysteme	23
3.4.1 Beziehung zwischen AR-Systemen und Assistenzsystemen	24
3.4.2 Assistenzsysteme im Flurförderzeug	25
4 Aufgabenanalyse und Entwicklung von Einsatzszenarien	27
4.1 Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers	27

4.1.1	Aufgabenanalyse	27
4.1.2	Klassifizierung der Elementaraufgaben	32
4.1.3	Experten-Interviews	32
4.2	Vorüberlegung zur Entwicklung von Einsatzszenarien	33
4.2.1	Strategie	33
4.2.2	Zielgruppe	34
4.3	Einsatzszenarien	34
4.3.1	Szenario 1: Navigationsanzeige	34
4.3.2	Szenario 2: Kollisionswarnung	35
4.3.3	Szenario 3: Kritischer Betriebszustand	36
4.3.4	Szenario 4: Auftragsdaten und Lastinformation	37
4.3.5	Szenario 5: Virtuelle Gabel	37
4.3.6	Szenario 6: Markierung der Quelle und Senke	39
4.4	Auswahl des Einsatzszenarios	40
4.4.1	Bewertung der Einsatzszenarien	40
4.4.2	Virtuelle Gabel	42
5	Konzeptentwicklung Demonstrator	45
5.1	Anforderungsanalyse	45
5.2	Visualisierungsmedium	46
5.2.1	Automobiles Head-up Display	46
5.2.2	Datenbrille	48
5.2.3	Projection Mapping	48
5.2.4	Emissive Projection Display	49
5.2.5	Auswahl des Visualisierungsmediums	51
5.3	Technisches Gesamtkonzept	51
5.4	Hardware-Konzept	52
5.4.1	Informationsgewinnung – Bedienung Hydraulik	52
5.4.2	Informationsgewinnung – Pose Fahrer	52
5.4.3	Informationsgewinnung – Pose Gabel/Hubmast	53
5.4.4	Informationsdarstellung – Emissive Projection Display	55
5.5	Software-Konzept	56
6	Konzeptentwicklung Anzeige	57
6.1	Voruntersuchungen	57

6.1.1	Vergleich Informationspräsentation auf der Windschutzscheibe zu simulierten Head-up-Display hinsichtlich Ablenkung	58
6.1.2	Informationspräsentation auf der Windschutzscheibe – Vergleich von Symbolik und Ziffern hinsichtlich Ablenkung	60
6.1.3	Zusammenfassung	62
6.2	Ergonomisches Anzeigekonzept	62
6.2.1	Sichtanalyse mit RAMSIS zur Festlegung der Anzeigeposition	63
6.2.1.1	Das CAD-Tool RAMSIS	64
6.2.1.2	Eingesetzte CAD-Modelle	65
6.2.1.3	Auswahl und Positionierung der Manikins	66
6.2.1.4	Horizontale Positionierung der Symbole	68
6.2.1.5	Vertikale Positionierung der Symbole	70
6.2.1.6	Ermittlung der Anzeigehöhe für die Statusanzeige	73
6.2.1.7	Zusammenfassung der Anzeigebereiche	73
6.2.2	Gestaltung des Anzeigekonzepts	74
6.2.2.1	Symbolgröße	74
6.2.2.2	Weitere Anforderungen	79
6.2.3	Evaluation des Anzeigekonzepts mit Expertenbeurteilung und Kleinstudie	81
6.2.4	Umsetzung des Anzeigekonzepts	82
7	Implementierung des Demonstrators	89
7.1	Verwendeter Gabelstapler	89
7.2	Informationsgewinnung – Tracking	90
7.2.1	Tracking Staplerauge	90
7.2.2	Tracking Metaio	92
7.3	Informationsverarbeitung – Kontext	95
7.3.1	Software-Modul Middleware	96
7.3.2	Programmablauf Lasthandling	97
7.3.3	Programmablauf Parcour	97
7.4	Informationsdarstellung – Emissive Projection Display	97
7.4.1	Folie	97
7.4.2	Projektor	98
7.4.3	Anbringung des Laserprojektors an der Kabine	102
7.4.4	Laserschutz	102

7.4.5 Software zur Ansteuerung des Laserprojektors	103
7.5 Sonstige Hardware	104
8 Evaluation	107
8.1 Versuchsumgebung	107
8.2 Versuchsfahrzeug	108
8.3 Hauptstudie – Methodik und Ergebnisse	109
8.3.1 Versuchsdurchführung	110
8.3.2 Datenaufbereitung und statistische Datenauswertung	112
8.3.3 Ergebnisse	112
8.3.3.1 Probandenkollektiv	112
8.3.3.2 Objektive Daten	113
8.3.3.3 Subjektive Daten	117
8.4 Nachstudie – Methodik und Ergebnisse	119
8.4.1 Versuchsbeschreibung	120
8.4.2 Datenaufbereitung und deskriptive Datenauswertung	121
8.4.3 Ergebnisse	121
8.4.3.1 Probandenkollektiv	121
8.4.3.2 Objektive Daten	122
8.5 Zusammenfassung	123
9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	125
9.1 Zusammenfassung	125
9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten	126
9.3 Ausblick	127
Literaturverzeichnis	129
Abbildungsverzeichnis	137
Tabellenverzeichnis	143
Anhang A Aufgabenanalyse	A-1
Anhang B Lastenheft	B-1
Anhang C Hauptstudie Fragebögen	C-1
Anhang D Hauptstudie Evaluation Ergebnisse	D-1
IV	

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
AR	Augmented Reality
EPD	Emissive Projection Display
FAS	Fahrerassistenzsystem
FFZ	Flurförderzeug
FHG	Freiheitsgrad
FOV	Field of View, Blickwinkel
HDD	Head-down Display
HUD	Head-up Display
LCT	Lane Change Task
M2M	Machine-to-Machine-Kommunikation
MMS	Mensch-Maschine-Schnittstelle
mSmR	Mit Systemunterstützung mit Reihenfolge
mSoR	Mit Systemunterstützung ohne Reihenfolge
oSmR	Ohne Systemunterstützung mit Reihenfolge
oSoR	Ohne Systemunterstützung ohne Reihenfolge
OWI	Overall Workload Index
RTLS	Realtime Locating System
SUS	System Usability Scale
VR	Virtual Reality
WSS	Windschutzscheibe

1 Management Report

Information presentation in industrial trucks has attracted a growing interest in the area of logistics in order to achieve a more efficient working process. The results of this research project demonstrate the possibilities of an information presented directly in the drivers field of view. Within the framework of the present research project, an ergonomic display concept for a counterweight forklift truck was developed which aims to assist the driver in fulfilling his dedicated tasks. The concentration of information in the drivers direct field of view offers an advantage to systems and display systems available on the market that tend to force the user to avert his gaze. Despite limitations with respect to a covering superposition, the researched display concept can be assigned to the augmented reality (AR) technology as the presentation of information refers geometrically to the warehouse surroundings and chronologically to the work flow.

Through an activity analysis on the operation of counterweight forklift trucks in warehouses and manufacturing plants use cases were determined, in which the driver is in need of assistance. Based on this and with respect to criteria such as feasibility, economic viability and functional benefits, the scenario of load handling task was chosen. In this scenario, the driver is informed about the inclination of the lift mast and the pose of the fork arms relative to a pallet or a storage slot. In addition, instructions for operation and positive feedback for correct processing are presented to the driver. The derived system requirements include capturing the geometrical parameters of the fork arms and the mast lift. Additional requirements are established regarding the ergonomic principles of designing an optimal human-machine interface. Taking into account the above requirements, a technical and an ergonomic concept were developed for the AR-based assistance system. A so called Emissive Projection Display was selected for the visualization of the information. It comprises a special film that contains fluorescent nanoparticles and an ultraviolet laser light source. The nanoparticles in the film illuminate blue light when being excited by the laser. Thus, the windshield turns into a transparent display.

The evaluation of the display concept using the implemented AR-system is conducted in two studies considering the execution times of load handling operation procedures. Results show longer execution times when using the AR-system implemented with very narrow tolerances in comparison to the execution times without the system. In this case an increased accuracy of the operation procedures was

measured. These execution times tend to align when the tolerances are increased. Nevertheless, a certain accuracy can be guaranteed.

Enhancement with respect to laser safety and the transparency of the film is needed for a series launch of the researched system. It can be applied in the broad scope of industrial trucks. Although the system was evaluated in a forklift truck, it could also be adapted to be used with agricultural and construction vehicles. It is appropriate in applications in which a quick presentation of information is required and the driver must not avert his gaze from his current task.

2 Einleitung

Fortschritt und Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Anzeigetechnologien eröffnen neue Möglichkeiten der Informationsbereitstellung. In operativen Arbeitsprozessen, bei denen die Aufmerksamkeit auf die Handhabung von Arbeitsobjekten und Betriebsmitteln gerichtet ist, kann eine gezielte Darstellung relevanter Prozessinformationen den Arbeiter bei der Erfüllung seiner Aufgabe unterstützen. Erfolgt diese Darstellung kontextabhängig und durch Einblendung der Information in den primären Sichtbereich, handelt es sich um eine Augmented-Reality-Anwendung.

Die Nutzung von Augmented-Reality-Systemen im Bereich der Intralogistik wurde bereits am Beispiel der Kommissionierung mit vielversprechendem Ergebnis erforscht [Gün-2009, Gün-2012]. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird untersucht, welches Potenzial der Einsatz der Augmented-Reality-Technologie bietet, um den Fahrer von Flurförderzeugen bei der Bedienung zu unterstützen.

2.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Manuell bediente Gabelstapler werden als universelle Fördermittel zur Be- und Entladung von Lastkraftwagen, zum Transport, zur Verteilung und zur Ein- und Auslagerung von Waren eingesetzt. Allein in Deutschland sind insgesamt rund 600.000 bis 700.000 Flurförderzeuge [Bar-2011] in den verschiedensten Branchen im Einsatz. Zwar gibt es Tendenzen, einzelne Funktionen eines Flurförderzeugs zur Erleichterung des Bedieners zu automatisieren (z. B. automatische Positionierung der Gabeln mittels Hubhöhenvorwahl bei Hochregal- und Schubmaststaplern), dennoch bleibt der Mensch die zentrale Entscheidungsinstanz. Damit dieser den Stapler möglichst sicher und effizient bedienen kann, kommt der Informationsbereitstellung und somit der Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS) eine hohe Bedeutung zu. In derzeit auf dem Markt verfügbaren Flurförderzeugen erhält der Fahrer nur wenige Informationen zur Durchführung der Arbeitsaufgabe und zu Maschinendaten (z. B. Geschwindigkeit, Lenkwinkel, Batterie-Status). Die Visualisierung von Arbeitsanweisungen und Navigationsinformationen erfolgt oft in Textform auf einem Terminal. Da die Informationen auf verschiedene Anzeigen verteilt sind, stehen sie dem Bediener nicht in dessen primärem Blickfeld zur Verfügung. Durch den Einsatz der AR-Technologie kann die Darstellung der Informationen zentralisiert werden. Die Möglichkeit, virtuelle Informationen darzustellen und bei Bedarf perspektivisch richtig mit der Realität zu

überlagern, führt zu einer Erleichterung bei der Informationsaufnahme. Dies spiegelt sich auch in den logistischen Kennzahlen wider. So hat beispielsweise ein Labortest im Rahmen des Forschungsprojektes Pick-by-Vision (IGF-FV14756) ergeben, dass die Kommissionierleistung durch die Verwendung eines AR-unterstützten Kommissioniersystems um 10 % gegenüber einer konventionellen Papierliste steigt, während gleichzeitig die Fehlerrate um 50 % sinkt [Gün-2009]. Insbesondere bei Flurförderzeugen ist eine niedrige Spielzeit ein wesentlicher Wettbewerbsvorteil. Während die Reduktion der Spielzeit durch die Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit in vielen Fällen aufgrund technischer oder sicherheitsrelevanter Aspekte nicht mehr möglich ist, bietet die kontextbezogene Bereitstellung von Informationen eine zusätzliche Möglichkeit, die Effizienz noch weiter zu steigern. Die AR-Technologie ist keine Neuentwicklung der letzten Zeit, sondern hat in verschiedenen Anwendungen bereits ihre Einsatzfähigkeit gezeigt. So gibt es außer ihrer ursprünglichen militärischen Anwendung zwischenzeitlich ein breites Spektrum an Einsatzfeldern, wie z. B. in der Medizintechnik oder im Personenkraftwagen (PKW). Eine umfangreiche Beschreibung findet sich im Stand der Technik und der Wissenschaft in Kapitel 3.

Eine mögliche Folgerung, dass der Einsatz der AR-Technologie in Flurförderzeugen lediglich eine Erweiterung des Einsatzfeldes mit bestehender Soft- und Hardware bzw. Anwendungskonzepten darstellt, ist jedoch nicht zutreffend. Die erfolgreiche Integration der AR-Technologie in Flurförderzeuge erfordert wegen der speziellen Anforderungen, auf welche im Folgenden kurz eingegangen werden soll, umfangreiche wissenschaftliche Untersuchungen.

Das Blickfeld des Fahrers ist aufgrund der anderen Aufgaben, die beim Fahren zu erledigen sind, gänzlich anders als bei den bekannten Einsätzen im PKW oder Flugzeug. Erfahrungen aus diesen Bereichen sind dementsprechend nicht direkt übertragbar und müssen deswegen durch neue Untersuchungen ergänzt werden, um eine bestmögliche Unterstützung des Fahrers zu erreichen. Durch eine interdisziplinäre Forschung, bei der sowohl die Anforderungen aus der innerbetrieblichen Logistik als auch aus ergonomischer Sicht berücksichtigt werden, ist dies gewährleistet. Eine weitere wissenschaftlich-technische Problemstellung ergibt sich aus den unterschiedlichen Anforderungen an das AR-System, die je nach Einsatzfall oder Fahrsituation variieren. So ist die Anzeige sowohl von Betriebsdaten wie Fahrgeschwindigkeit und Batteriestatus als auch von Auftragsdaten wie der anzufahrende Lagerplatz, eventuell ergänzt durch Navigationsinformationen, von Interesse. Informationen zum gezielten Eintauchen in Paletten und zu einem genauen Absetzen der Last können den Fahrer beim Lasthandling in großen Höhen oder bei verdeckter Sicht unterstützen. Dies erfordert ein einheitliches Konzept, welches im Rahmen von grundlegenden Untersuchungen erarbeitet werden muss. Überdies muss beachtet

werden, dass die spätere Nutzung eines solchen AR-Systems durch Personal erfolgt, das noch keine Erfahrung mit dieser Technologie besitzt und im Vergleich zum PKW-Fahrer nicht selbst die Kaufentscheidung für diese Form der Unterstützung getätigt hat. Folglich sind die Akzeptanz der Fahrer sowie die Handhabung des Systems wissenschaftlich zu untersuchen.

2.2 Forschungsziel

2.2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Das übergeordnete Ziel des Forschungsprojektes ist das Aufzeigen des Potenzials der Augmented-Reality-Technologie zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen. Dazu soll ein System entwickelt werden, das den Fahrer durch die intuitive und kontextbezogene Einblendung relevanter Informationen direkt in das Sichtfeld dabei unterstützt, das Flurförderzeug effizient und sicher zu bedienen.

Die Ist-Analyse zu Beginn des Projektes zielt darauf ab, die Bediensituationen eines Flurförderzeugs zu identifizieren, in denen ein großes Verbesserungspotenzial bzw. ein hohes Sicherheitsrisiko besteht. Ein weiteres Forschungsziel ist die Erstellung einer Übersicht, welche Informationen vom Fahrer eines Flurförderzeugs in einer bestimmten Situation benötigt werden.

Die Umsetzung eines vielversprechenden Konzepts zielt zum einen auf die Bewertung der technischen Machbarkeit ab, bildet aber gleichzeitig die Grundlage für praxisnahe Erfahrungen hinsichtlich objektiv messbarer und subjektiver Kriterien. Aus den Erfahrungen mit dem Demonstrator sollen Gestaltungsrichtlinien für die AR-unterstützte Mensch-Maschine-Schnittstelle im Flurförderzeug abgeleitet werden.

2.2.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse

Im Rahmen des beantragten Forschungsvorhabens wird auf Basis der AR-Technologie ein System entwickelt, das den Fahrer von Flurförderzeugen bei der sicheren und effizienten Erfüllung seiner Arbeitsaufgaben unterstützt. Durch dieses System wird ein Beitrag zu einem neuen Produkt im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle in Flurförderzeugen geleistet. Während bei bisherigen Anzeigekonzepten wichtige Betriebsdaten und auftragsbezogene Informationen auf verschiedene Anzeigen verteilt sind oder gänzlich fehlen, zielt das Forschungsvorhaben darauf ab, die relevanten Informationen direkt im Sichtfeld des Fahrers und abhängig vom Kontext bereitzustellen.

Zwar existieren bereits seit den 1940er Jahren Lösungen für Flugzeuge [Sch-2011], die in den letzten Jahren auch auf das Automobil adaptiert wurden, jedoch erfordert der Einsatz im Flurförderzeug die Berücksichtigung spezifischer Anforderungen. Während beispielsweise in Kampfflugzeugen die Kosten für das System eine untergeordnete Rolle spielen, ist beim Flurförderzeug als Arbeitsgerät die Wirtschaftlichkeit ein wesentliches Kriterium. Deshalb ist eine einfache Übertragung der bekannten technischen Lösungen auf das Flurförderzeug nicht zielführend, sondern erfordert die Entwicklung eines innovativen Systems.

2.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels

2.3.1 Festlegung auf Gegengewichtsgabelstapler als Forschungsgegenstand

Laut VDI-Richtlinie sind Flurförderzeuge „alle auf dem Boden (Flur), nicht auf Schienen fahrende Fördermittel. Sie dienen im innerbetrieblichen Transport ihrer Bauart nach dem Befördern, Ziehen, Schieben, Heben, Stapeln oder In-Regale-Einlagern von Lasten aller Art. Sie sind fahrerlos, mitgängergeführt oder von einem Fahrer bedient, der auf dem Flurförderzeug oder einem hebbaren Fahrerplatz sitzt oder steht“ [VDI 3586]. Die Gruppe der Flurförderzeuge beinhaltet eine Vielzahl an unterschiedlichen Fördermitteln, so dass ein repräsentatives Fördermittel ausgewählt werden muss, anhand dessen das AR-System entwickelt wird. Vorüberlegungen haben ergeben, dass ein Einsatz der AR-Technologie bei Gegengewichtsgabelstaplern als Vertreter der Flurförderzeuge am vielversprechendsten ist. Diese sind folgend erläutert:

- Gegengewichtsgabelstapler sind nicht für eine Aufgabe spezialisiert und universell einsetzbar. Sie bilden ein breites Spektrum von Arbeitsaufgaben ab, bei denen der Fahrer unterstützt werden kann.
- Der Fahrer ist beim Betrieb auf dem Fahrersitz positioniert. Dadurch kann ein AR-System gerichtet auf den Fahrer einwirken.
- Durch die Kabine ist eine definierte Umgebung gegeben, die für die Installation und den Betrieb von AR-Systemen genutzt werden kann (z. B. Frontscheibe, Bauraum vorhanden).

Es werden ausschließlich Frontstapler betrachtet. Der besseren Lesbarkeit halber wird nachfolgend in diesem Forschungsbericht der Ausdruck Gabelstapler synonym gesetzt zu der ausführlichen Bezeichnung Gegengewichtsgabelstapler.

2.3.2 Lösungsweg und Arbeitspakete

Zur Realisierung des Forschungsziels wird das Vorhaben in insgesamt drei Teilpakete untergliedert (Abbildung 2-1). Teilpaket 1 umfasst eine detaillierte Analyse des IST-Stands hinsichtlich des Aufgabenspektrums sowie der gegenwärtigen Art der Informationsbereitstellung beim Einsatz von Flurförderzeugen. Davon ausgehend werden zielführende Einsatzszenarien abgeleitet und durch Aufstellen der damit verbundenen Anforderungen präzisiert. Zu Beginn von Teilpaket 2 werden zunächst die aktuell am Markt befindlichen Hard- und Softwarekomponenten recherchiert. Anschließend werden innerhalb der Konzeptionsphase geeignete Lösungsansätze generiert, welche als solide Ausgangsbasis sowohl für die softwareseitige Implementierung als auch der hardwaretechnischen Umsetzung eines funktionsfähigen Demonstrators dienen. Teilpaket 3 beschreibt vorwiegend die Evaluierung des entwickelten Funktionsmusters. Ein Probandenversuch in der Laborumgebung des Lehrstuhls fml ist hierin vorgesehen. Die Dokumentation des Vorhabens erfolgt abschließend mit Hilfe eines ausführlichen Forschungsberichts.



Abbildung 2-1: Methodisches Vorgehen

AP 1: Analyse IST-Stand

Die Analyse des Ist-Standes zielt darauf ab, systematisch alle relevanten Situationen bzw. Aufgaben zu erfassen, bei denen der Gabelstaplerfahrer durch Informationen direkt in seinem Sichtfeld unterstützt werden kann. Eine Datenerhebung bei Betreibern von Flurförderzeugen wird in Form von Videoaufnahmen und Interviews durch-

geführt. Darüber hinaus erfolgt die Analyse von derzeit eingesetzten Arten der Informationsbereitstellung in Flurförderzeugen, um deren Stärken und Schwächen gegenüberzustellen und Handlungsempfehlungen bzw. Gestaltungsrichtlinien für eine AR-unterstützte Mensch-Maschine-Schnittstelle ableiten zu können. (Kapitel 3, 4)

AP 2: Entwicklung von Einsatzszenarien

Unter Betrachtung des im Rahmen der Analyse des IST-Standes herausgestellten breiten Spektrums an möglichen Aufgaben werden alternative Einsatzszenarien entwickelt. Aus den erarbeiteten Szenarien ist anschließend dasjenige zu identifizieren, bei dem der AR-Einsatz den größten Mehrwert gegenüber konventionellen Anzeigen bietet. (Kapitel 4)

AP 3: Aufstellen der Anforderungen

Grundlegende Anforderungen an ein AR-gestütztes Anzeigekonzept im Gabelstapler werden herausgearbeitet. Basierend auf dem gewählten Einsatzszenario werden neben funktionalen Anforderungen sowie technologischen Anforderungen an Hardware und Software ebenfalls Anforderungen aus Sicht der Ergonomie bestimmt. (Kapitel 5)

AP 4: Recherche Hardware und Software

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets zu tätigen Recherchen dienen der Ermittlung der für die Realisierung des geplanten Funktionsmusters geeigneten Hard- und Softwarekomponenten. Es gilt, die zur Visualisierung benötigten Hardwarekomponenten zu identifizieren. Im Fokus der Untersuchung stehen hierbei vorwiegend die Darstellungsmedien Head-Mounted Display (HMD) und Head-up Display (HUD). (Kapitel 5)

AP 5: Entwicklung von Konzepten

Basierend auf den Recherchen in AP 4 und unter Berücksichtigung der Anforderungen aus AP 3 wird ein Konzept für das AR-System zur Unterstützung des Fahrers entwickelt. (Kapitel 5, 6)

AP 6: Implementierung eines Demonstrators

Bei der Implementierung wird das zuvor entwickelte Konzept umgesetzt. Hinsichtlich der Hardwarekomponenten steht die Anpassung des Anzeigegerätes im Fokus des Forschungsprojektes. So ist es erforderlich, dass die Staplerkabine, insbesondere die Frontscheibe, und die bilderzeugende Einheit aufeinander abgestimmt sind. Die-

ses Vorgehen ist in zwei Phasen angedacht. In Phase 1 der Implementierung wird ein Prüfstand in Form einer reinen Staplerkabine aufgebaut, der idealisierte Bedingungen für den Einbau des AR-Systems bietet und schrittweise an die Bedingungen in einem realen Versuchsfahrzeug angepasst werden kann. In Phase 2 erfolgt die Umrüstung eines realen Versuchsflurförderzeugs. Dies ist erforderlich, um die neue Technologie im Rahmen von Probandenversuchen unter realen Bedingungen testen zu können. (Kapitel 7)

AP7: Evaluation des Demonstrators

Um abschließend sowohl die Funktionsfähigkeit des Demonstrators als auch die Vorteile des AR-Einsatzes bewerten zu können, ist eine Evaluation in Form von Probandenversuchen erforderlich. Dazu wird ein einfaches Probandenprogramm ausgearbeitet, das sich sowohl mit hardware- als auch softwaretechnischen Fragestellungen auseinandersetzt. Im Rahmen der Labortestreihen finden sowohl objektive Messkriterien (z. B. Zeiteinsparung bei einer definierten Arbeitsaufgabe mit AR-Einsatz) als auch subjektive Empfindung der Probanden (z. B. hinsichtlich Akzeptanz, Reizüberflutung oder Ablenkung) Berücksichtigung. Vorwiegend mit Hilfe von Fragebögen und Interviews können in dieser Phase evtl. noch auftretende Probleme aufgedeckt und durch entsprechende Gegenmaßnahmen innerhalb einer darauf anschließenden Überarbeitungsphase beseitigt werden. (Kapitel 8)

AP 8: Dokumentation

Zur weiteren Nutzung der während des Projektes erarbeiteten Forschungsergebnisse werden diese in Form eines ausführlichen Forschungsberichts dokumentiert. Wesentliche Inhalte sind die zur Entwicklung des Funktionsmusters notwendigen Handlungsschritte, das Aufzeigen der sich einstellenden Verbesserungspotenziale durch Nutzung der AR-Technologie sowie Vorgehensweisen für die optimale Integration eines derartigen Systems in bestehende Lagerumgebungen.

3 Stand der Technik und der Wissenschaft

Dieses Kapitel umfasst Definitionen und Grundlagen der beiden zentralen Themen des Forschungsvorhabens. Zum einen wird auf die Technologie Augmented Reality eingegangen. Zum anderen wird der Arbeitsplatz eines Fahrers von Gabelstaplern beleuchtet. Dazu gehören die genauere Betrachtung der Informationsbereitstellung innerhalb der Kabine und die Untersuchung von Assistenzsystemen.

3.1 Augmented Reality

3.1.1 Begriffsdefinition

Augmented Reality (auf Deutsch: Erweiterte Realität) bezeichnet in seiner allgemeinsten Definition die computergestützte Erweiterung der Realitätswahrnehmung. Dem Menschen werden bei der Wahrnehmung seiner Umgebung oder einer Situation, in der er sich befindet, computergenerierte, virtuelle Informationen übermittelt, die Bezug zu der Umgebung oder der Situation nehmen und somit im Kontext stehen. Dabei kann prinzipiell jede Sinneswahrnehmung angesprochen werden [Mil-1999]. Aufgrund der überwiegenden Informationsaufnahme des Menschen über das Auge, etwa 70 bis 80% der insgesamt aufgenommenen Information [Adl-2010], wird im Zusammenhang mit Augmented Reality (AR) jedoch meist die visuelle Wahrnehmung betrachtet. Für andere Definitionen in der Fachliteratur ist die visuelle Informationsbereitstellung gar Voraussetzung [Mil-1999, Azu-2001].

Weite Verbreitung findet die Definition von *Azuma* [Azu-1997], welche unabhängig technischer Eigenschaften ein AR-System definiert und wie folgt von [Gün-2012] interpretiert wird:

„Ein AR-System ist ein System, welches virtuelle und reale Objekte kombiniert und in eine dreidimensionale Beziehung stellt sowie die Interaktion in Echtzeit erlaubt.“

AR-Anwendungen gibt es in verschiedenen Ausprägungen. Eine exakte Überlagerung virtueller Objekte auf reale Objekte ist je nach Anforderung schwer bis gar nicht zu realisieren, so dass auch abgeschwächte Anwendungen existieren, bei denen keine visuell-realistische Darstellung, aber eine informative Darstellung erzielt wird. Nach [Gün-2011] lassen sich in Anlehnung an [Rei-2009], [Alt-2002], [Fri-2004] [Pat-2004] die drei folgenden Arten der Informationsbereitstellung unterscheiden:

- **Kontextunabhängig:** Die Informationen werden ohne Berücksichtigung der Situation sowie ohne Bezug zur räumlichen Umgebung bereitgestellt.
- **Kontextabhängig** (situationsgerecht): Die Informationen werden dem aktuell betrachteten, realen Objekt zugeordnet und dementsprechend zur richtigen Zeit und am richtigen Ort bereitgestellt.
- **Kongruent:** Die Informationen werden exakt an der Position des entsprechenden realen Objektes und in der richtigen Perspektive bereitgestellt.

Im Weiteren wird in dieser Arbeit eine visuelle, kontextabhängige Informationsdarstellung betrachtet.

3.1.2 Begriffsabgrenzung

Milgram ordnet AR anhand des Reality-Virtuality-Kontinuums ein und zieht die in Abbildung 3-1 dargestellte Abgrenzung. Zwischen der realen Welt und einer als Virtual Reality bezeichneten vollständig computer-generierten, virtuellen Welt befinden sich die AR und die Augmented Virtuality (AV). Bei der AR wird die reale Welt mit virtuellen Objekten angereichert im Unterschied zur AV, bei der eine virtuelle Welt mit realen Objekten erweitert wird. [Mil-1994]

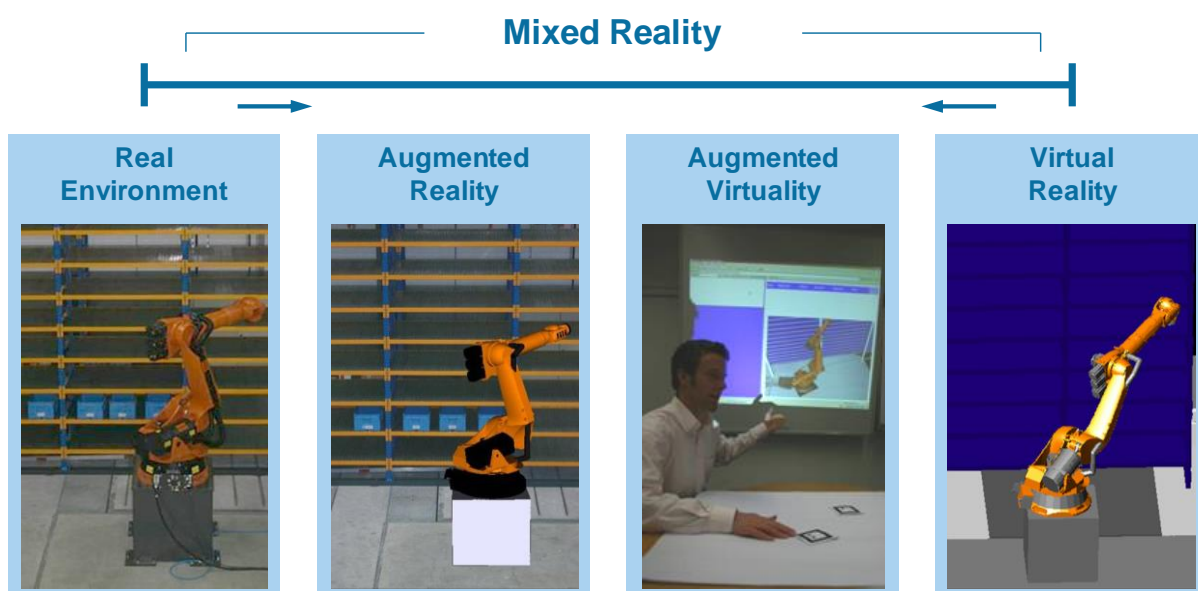


Abbildung 3-1: Reality-Virtuality-Kontinuum (vgl. [Gün-2011] nach [Mil-1994])

3.1.3 Komponenten eines AR-Systems

Ein AR-System besteht aus den folgenden wesentlichen Komponenten:

- 1) Trackingsystem
- 2) Kontextinterpretier – Datenhaltungssystem
- 3) Szenengenerator
- 4) Visualisierungsmedium

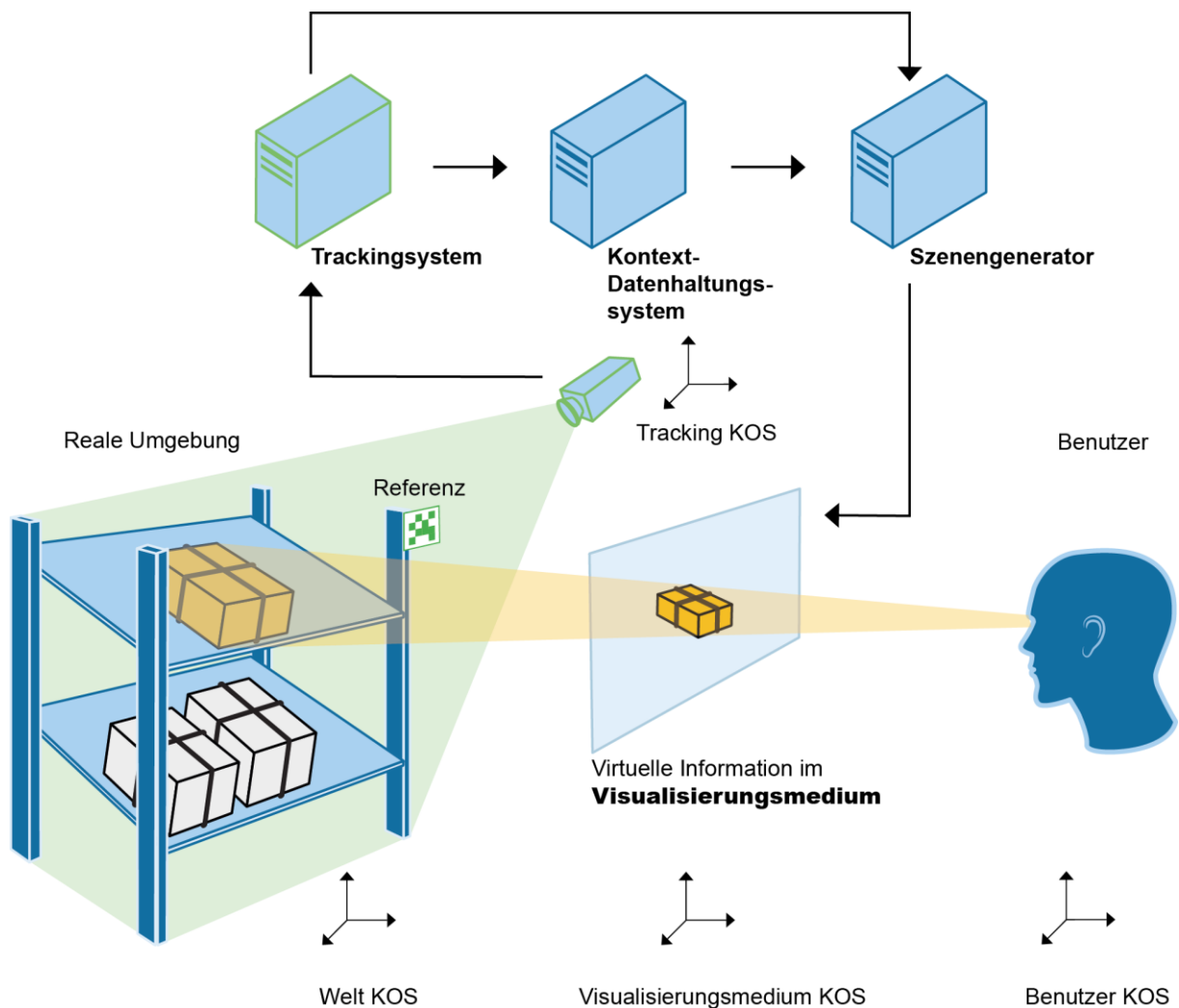


Abbildung 3-2: Komponenten eines AR-Systems

Trackingsystem

Das Trackingsystem ermittelt die geometrische Beziehung zwischen dem Benutzer eines AR-Systems, seiner betrachteten Umgebung und ggf. des verwendeten Visualisierungsmediums. Dimensionalität und Genauigkeit des Tracking sind abhängig vom Anforderungsgrad an die AR-Anwendung. Sollen beispielsweise lediglich Textinformationen passend zur Blickrichtung und Entfernung des Benutzers zu einem

Objekt eingeblendet werden, genügt ein Trackingsystem, welches die drei Translationswerte (horizontale und vertikale Verschiebung, Distanz) des betrachteten Objekts zum Benutzer ermittelt. In diesem Fall spricht man von drei Freiheitsgraden (FHG). Eine kongruente Informationsdarstellung hingegen benötigt die Ermittlung der drei Translationen und der drei Rotationen im Raum, um ein virtuelles Objekt exakt über ein reales Objekt zu überlagern (sechs Freiheitsgrade). Die Genauigkeit des Trackings muss so hoch sein, dass keine Abweichung von Position (Translation) und Orientierung (Rotation) zwischen virtuellem und realem Objekt erkennbar ist. Die Kombination aus Position und Orientierung wird als Pose bezeichnet [DIN EN ISO 8373]. Das Tracking der Pose entspricht einem Tracking von sechs FHG und ist eine weit verbreitete Technik in der AR.

Kontextinterpretier – Datenhaltungssystem

Diese Komponente beinhaltet zum einen die Logik eines AR-Systems. Anhand der geometrischen Daten ist dem System bekannt, wie der Benutzer in der Umgebung eingebunden ist. Der geometrische Kontext ist hergestellt und davon abgeleitet kann bestimmt werden, welche virtuelle Information dargestellt werden soll. Je nach Komplexität des Interpretiers werden neben den geometrischen Daten auch zeitliche Abläufe, wie zum Beispiel Arbeitsvorgänge, sowie andere äußere Zustände und Ereignisse berücksichtigt. Damit ist eine räumliche, zeitliche und von äußeren Einflüssen bedingte Interpretation des Kontexts oder auch der Situation möglich.

Zum anderen sind in dieser Komponente die virtuellen Informationen, welche dem Benutzer bereitgestellt werden, gespeichert. Diese werden wie oben beschrieben kontextabhängig ausgewählt und an den Szenengenerator übergeben.

Szenengenerator

Der Szenengenerator berechnet in Abhängigkeit der Trackingdaten und der technischen Eigenschaften des verwendeten Visualisierungsmediums die Darstellung der virtuellen Objekte in einer für den Benutzer richtigen Perspektive.

Visualisierungsmedium

Das Visualisierungsmedium ist die Anzeige des AR-Systems. Diese bildet die physische Schnittstelle zum Benutzer. Es gibt zahlreiche Typen von Visualisierungsmedien. Abbildung 3-3 fasst unterschiedliche Konzepte zusammen, welche nach folgenden zwei Hauptmerkmalen gegeneinander abgegrenzt werden [Bim-2005]:

- Position der bildgebenden Einheit
- Position der Darstellung des Bildes

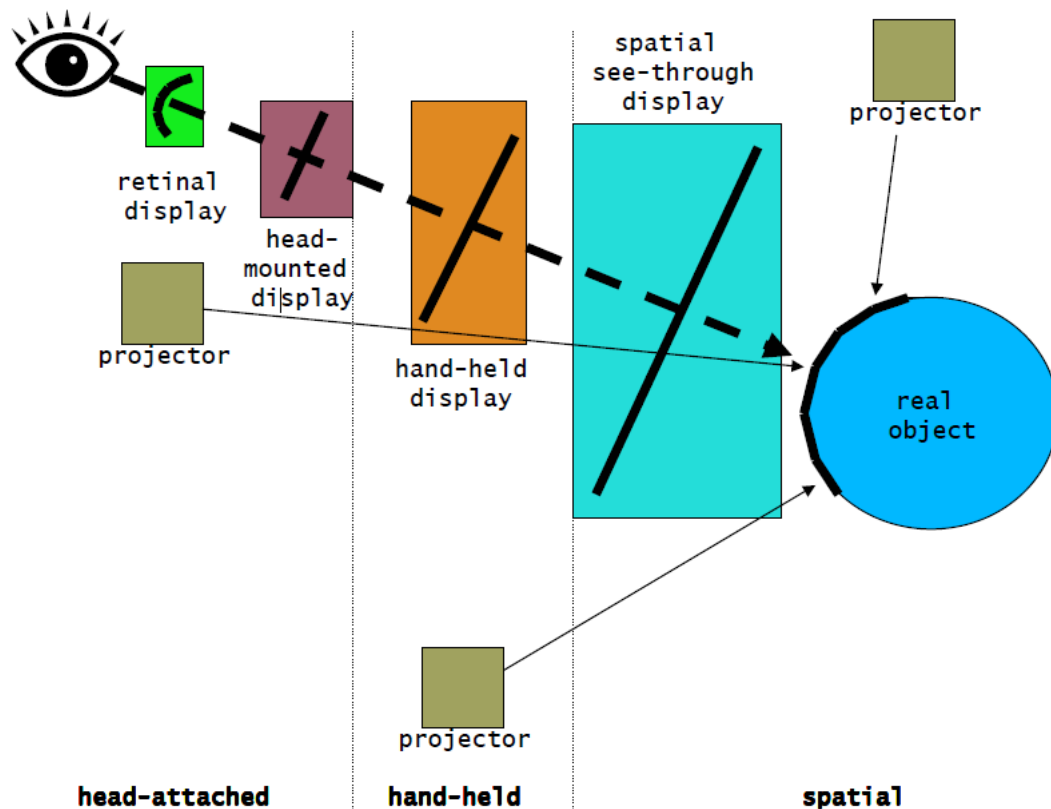


Abbildung 3-3: Einteilung von Visualisierungsmedien (Quelle: [Bim-2005])

Die Positionsbereiche wiederum werden üblicherweise unterteilt in (vgl. [Bim-2005]):

- Am Kopf (head-attached)
- In der Hand (hand-held)
- Im Raum (spatial)

Des Weiteren erfolgt eine Einteilung des Visualisierungsmediums anhand seiner Durchsichtigkeit. Durchsichtige Anzeigen werden als Optical-See-Through Displays [Bim-2005] bezeichnet. Sie ermöglichen eine direkte Sicht auf die reale Welt und eine gleichzeitige Einblendung von virtuellen Informationen.

Nichtdurchsichtige Anzeigen heißen Look-Around Anzeigen, da sie einen Teil des Sichtfeldes verdecken und nur die Sicht an der Anzeige vorbei möglich ist. Mit einer Look-Around Anzeige ist keine AR-Visualisierung im Sinne von optischer Überlagerung darstellbar. Sie kann dennoch für eine kontextabhängige Informationsbereitstellung verwendet werden.

Bei den meisten am Kopf getragenen Visualisierungsmedien handelt es sich um Datenbrillen, auch Head-mounted Display (HMD, Abbildung 3-3) bezeichnet, in die

Displays mit geringen Abmessungen integriert sind. Anzeigesysteme, bei denen der Benutzer die Blickrichtung auf seine primäre Tätigkeit beibehalten kann bzw. den Kopf oben (Englisch: up) halten kann und nicht abwenden muss, werden als Head-up Display (HUD) bezeichnet.

3.2 AR-Anwendung in Fahrzeugen

AR-Anwendungen finden sich in diversen Anwendungsbereichen, angefangen bei Smartphone-Apps im Marketingsektor über Layoutplanungsprozesse in Industriebauten bis hin zum Einsatz als Operationshilfe in medizinischen Anwendungen. AR-Systeme, die den Führer von Fahrzeugen unterstützen, sind vor allem in Flugzeugen und im Automobil vertreten. So gibt es schon seit 1940 Head-up Displays (HUD) im Kampfflugzeug [Sch-2011]. Im Automobil findet das HUD in den letzten Jahren immer mehr Verbreitung.

Da im vorliegenden Forschungsprojekt die Unterstützung des Fahrers von Gabelstaplern untersucht wird, soll in diesem Unterkapitel näher auf die HUD-Technologie im Automobil als artverwandte Anwendung eingegangen werden.

3.2.1 Funktionsweise eines Head-up Displays (HUD) im Automobil

Automobile HUDs ermöglichen es dem Fahrer Informationen in das primäre Sichtfeld in Fahrtrichtung einzublenden. Der Fahrer kann sich auf das Verkehrsgeschehen konzentrieren und muss seinen Blick für die Informationsaufnahme im Gegensatz zum Ablesen von Informationen auf der Instrumententafel nicht abwenden. Das HUD erzeugt ein virtuelles Bild, welches vor der Windschutzscheibe über der Motorhaube erscheint. Als Folge muss der Fahrer beim Ablesen des HUDs seinen Blick lediglich von der Entfernung des realen Verkehrsgeschehens auf das virtuelle Bild fokussieren. Dieser Vorgang wird Akkommodation genannt. Beim Ablesen der Instrumententafel dauert die Akkommodation länger. [Win-2012]

Die Funktionsweise eines HUDs ist in Abbildung 3-4 abgebildet.

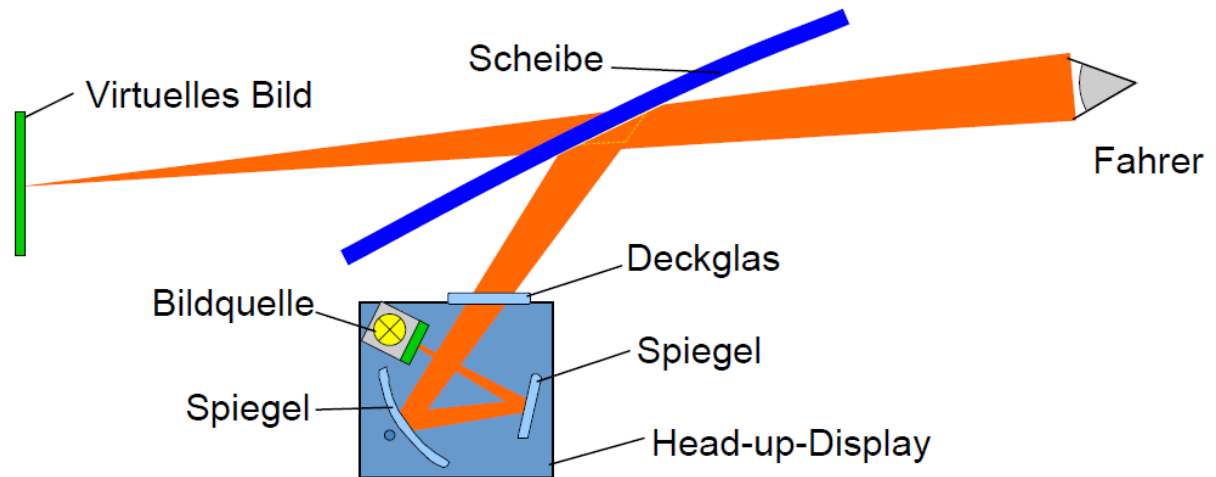


Abbildung 3-4: Aufbau eines HUD im Automobil (Quelle: [Sch-2009])

Zentraler Bestandteil bei einem solchen System ist die Windschutzscheibe. In dieser spiegelt sich das durch eine sehr helle Bildquelle erzeugte Bild, so dass für den Fahrer das virtuelle Bild entsteht. In einer kostengünstigeren Variante wird anstatt der Windschutzscheibe eine kleine transparente Kunststoffscheibe als Spiegel verwendet. In diesem Fall spricht man vom Combiner-HUD. Ein bei beiden Varianten durch den Systemaufbau bedingter Nachteil ist ein begrenzter Bereich, in dem der Fahrer das virtuelle Bild wahrnehmen kann. Dieser Bereich wird Eyebox genannt und liegt in der senkrechten Ebene zur Fahrtrichtung und erstreckt sich über einige Zentimeter. Bewegt der Fahrer seinen Kopf zu weit zur Seite oder nach oben und unten, ist das virtuelle Bild nicht mehr sichtbar. Im Automobil ist dies ein hinzunehmender Umstand, da der Körper während der Fahrt in relativ konstanter Position im Sitz verbleibt.

Die Anzeige eines HUDs entspricht einer kontextabhängigen Informationsdarstellung im Sichtbereich und kann somit als AR-Anwendung bezeichnet werden. Eine kongruente Darstellung wird im HUD nicht umgesetzt.

3.2.2 Kontaktanaloges Head-up Display

Das kontaktanaloge Head-up Display, auch AR Head-up Display genannt [Con-2014], stellt einen Schritt weiter in Richtung kongruenter Augmentierung dar. Bei dem kontaktanalogen HUD ist die Optik so konstruiert, dass das virtuelle Bild auf der Fahrbahnebene liegt. Symbole (z. B. Navigationspfeile) können perspektivisch korrekt und in richtiger Pose eingeblendet werden, so dass sie für den Fahrer auf der Fahrbahn erscheinen (siehe Abbildung 3-5). Solche Systeme befinden sich derzeit kurz vor dem Markteinstieg.

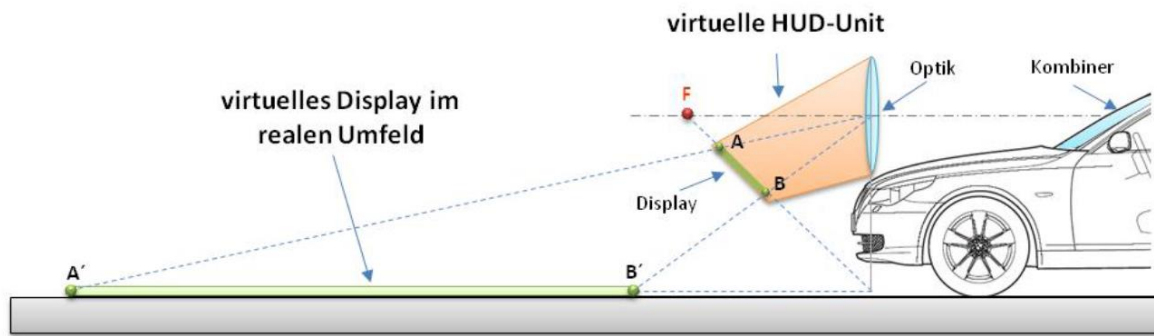


Abbildung 3-5: Methode des auf der Fahrbahn liegenden virtuellen Displays (Quelle: [Ber-2009])

3.3 Informationsbereitstellung im Gabelstapler

In diesem Kapitel wird die Informationsbereitstellung innerhalb der Kabine betrachtet sowie die aufgrund der spezifischen Sichtverhältnisse im Gabelstapler beschränkte Aufnahme visueller Informationen, die von außen eintreffen.

3.3.1 Serienmäßige Anzeigeelemente

Das Visualisierungsmedium ist ein zentraler Bestandteil in einem AR-System. Deshalb werden in diesem Abschnitt die unterschiedlichen Anzeigeelemente im Gabelstapler, die den Fahrer mit Information versorgen, beschrieben.

Die Informationsbereitstellung in aktuell erhältlichen Gabelstaplern variiert nach Ausstattung und Größe des Modells. Standard-Anzeigen von Gabelstaplern über alle Hersteller und Baureihen hinweg sind beispielsweise die Anzeige der Betriebsstunden und des Akkuladestands bzw. Kraftstofffüllstands. Mit steigender Ausstattung werden zusätzlich weitere Betriebszustände von Beleuchtung über Scheibenwischer bis hin zu Zustandsmeldungen von integrierten Assistenzsystemen angezeigt. Die Betriebszustandsanzeigen bestehen hauptsächlich aus LEDs, hinterleuchteten Symbolen, Segmentanzeigen (Abbildung 3-6 links) oder einfachen LCDs (Abbildung 3-6 rechts). Mittels Segmentanzeigen können Ziffern und Zeichen dargestellt werden. Einfache LCDs erweitern die Darstellung auf beliebige, vorgefertigte Symbole. In Bedienschaltern sind teilweise LEDs integriert, die anzeigen, ob eine Funktion aktiviert oder deaktiviert ist.

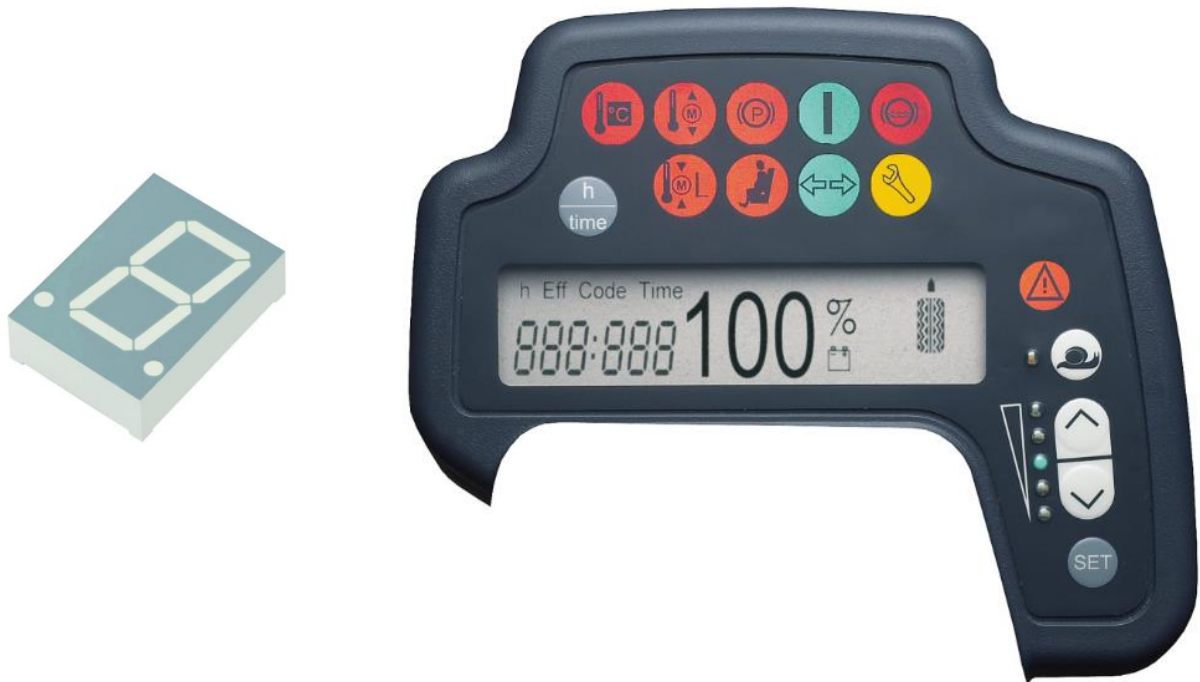


Abbildung 3-6: links: Segmentanzeige
rechts: Anzeigeeinheit eines Gabelstaplers (Quelle: Jungheinrich AG)

Aktiv-Matrix-Displays (eingesetzt im Computermonitor, Smartphone usw.), bei denen jedes Pixel einzeln angesteuert werden kann und die daher einen Grafikchip benötigen, werden außer in größeren diesel-und gasbetriebenen Baureihen kaum oder gar nicht verwendet.

Da der Staplersitz linksseitig positioniert ist, befinden sich die Betriebszustandsanzeigen meist auf der rechten Seite in der Fahrerkabine. Sie sind derart angebracht, dass sie möglichst die Sicht nach vorne und oben nicht einschränken. Form und Größe variieren nach Hersteller. Folgende Positionen sind weit verbreitet:

- In der rechten A-Säule unterhalb des Kabinendachs
- Rechts neben der Lenksäule
- In die Lenksäule integriert hinter dem Lenkrad (Abbildung 3-7)



Abbildung 3-7: Anzeigeeinheit hinter dem Lenkrad (Quelle: Jungheinrich AG)

3.3.2 Anzeigen von Staplerleitsystemen und Kamerasystemen

Aktiv-Matrix-Displays werden genutzt, wenn Staplerleitsysteme (SLS) sowie Rückfahrkamerasysteme und weitere Kamerasysteme eingesetzt werden. Diese Assistenzsysteme sind meist als Nachrüstgeräte realisiert und haben keine Schnittstelle zum Bordnetz des Staplers. Die Trennung von Bordnetz und zusätzlichen Geräten bedingt immer eine zusätzliche Anzeige.

Staplerleitsysteme

Bei einem Staplerleitsystem erhält der Fahrer seine Arbeitsaufgaben über ein Staplerterminal. Bei Staplerterminals handelt es sich entweder um Industrie-PCs oder industrietaugliche Tablets. Es gibt sie in unterschiedlichen Größen. Sie werden ebenfalls vorwiegend rechtsseitig in der Kabine positioniert. Da sie oft auch als Eingabegerät fungieren, müssen sie vom Fahrer unter ergonomischen Gesichtspunkten gut erreichbar sein.

Kamerasysteme

Kameras werden vor allem zur Rückraumüberwachung und zur Überwachung beim Lasthandling und Transport verwendet und je nach Anwendung u.a. an der Kabine, dem Hubgerüst oder an der Gabelzinke installiert. Das Videobild wird auf einem Monitor dargestellt. Gabelzinkenkameras unterstützen beim genauen Einfahren in Paletten. Dies ist in großen Höhen und unübersichtlichen Situationen hilfreich. Am Hubgerüst installierte Kameras sind gut dazu geeignet, den Raum vor dem Stapler aufzunehmen, wenn Ladung die Sicht versperrt.

Kombinationen von Anzeigen

Werden SLS und Kamerasysteme gleichzeitig eingesetzt, sind meist zwei Monitore nötig. Die Sicht nach vorne wird dadurch zusätzlich verdeckt. Vereinzelt gibt es Terminals, die einen Videoeingang besitzen und ein Kamerabild darstellen können.

Eine Integration von nicht OEM-Staplerleitsystemen oder Kamerasystemen in bestehende Bordnetze von Gabelstaplern ist nicht bekannt. Dies gilt entgegengesetzt genauso. Auf Staplerterminals werden keine Betriebszustände des Gabelstaplers dargestellt. Potenzial für eine Zusammenfassung der verschiedenen Anzeigen zu einer zentralen Anzeige und somit für eine Verringerung der Anzeigenanzahl und Sichtverdeckung ist gegeben.

3.3.3 Sichtverhältnisse im Gabelstapler

Um Informationen außerhalb der Kabine aufzunehmen, benötigt der Fahrer eine gute Sicht aus der Kabine. Diese ist bei Gabelstaplern eingeschränkt und unterscheidet sich von bekannten Sichtverhältnissen wie z. B. im PKW. In Abbildung 3-8 sind die Sichtverhältnisse inklusive der Verdeckungen (grau markierte Bereiche) schematisch skizziert. Folgende sichtverdeckende Bauteile sind zu nennen:

- Hubgerüst
- Last
- Kabinensäulen
- Fahrerschuttdach
- Anzeigen
- Spiegel
- Scheibenwischer
- Abgasanlage, Brennstoffbehälter (bei Gas- oder Dieselstaplern)

Vorwiegend das Hubgerüst und großvolumige Last versperrern die Sicht.



Abbildung 3-8: Sichtfeld eines Staplerfahrers (Quelle: [BGH-2014])

Hubgerüst

Das Hubgerüst schränkt die Sicht im Gegensatz zur Last dauerhaft ein. Es besteht aus:

- 2 - 3 seitlichen Masten
- 1 - 3 Hubzylinder/n
- 1 - 3 Hubkette/n
- Gabelträger samt Gabelzinken
- Hydraulikschläuchen
- Anbaugerät

Vor allem ein mittig angeordneter Hubzylinder behindert die Sicht. Seitliche Hubzylinder verhindern dies [Kau-2013]. Mast und Hubzylinder sind im Normalfall teleskopisch aufgebaut. Auf dem Markt sind Einfach- bis Vierfachhubgerüste erhältlich. Mit steigender Anzahl der Stufen steigen auch die Dicke der Masten und Zylinder und damit auch die Einschränkung der Sicht.

Last

Je nach Größe und Beschaffenheit der Last wird die Sicht nach vorne eingeschränkt bis komplett verdeckt. Versuche der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gastgewerbe BGN haben gezeigt, „dass ein Staplerfahrer, der eine 2,40 m tiefe und 1,70 m hohe Last geladen hat, den Kopf und die Schultern eines Fußgängers auf

dem Fahrweg erst in ca. 8 m Entfernung sehen kann. Wer näher am Stapler dran ist, befindet sich im toten Winkel“ [Gra-2008]. Ist die Sicht nach vorne versperrt, muss der Gabelstaplerfahrer die Last im Rückwärtsgang befördern.

Anzeigen

Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben werden neben serienmäßigen Displays weitere Displays im Gabelstapler eingesetzt. Diese verdecken je nach Position innerhalb der Kabine die Sicht nach außen.

Spiegel

Spiegel sind meist rechts oberhalb in der Kabine installiert. Sie sind wichtig, um dem Fahrer den Bereich hinter dem Gabelstapler anzuzeigen. Obwohl der Fahrer sich beim Rückwärtsfahren nach hinten drehen muss, geschieht dies in der Praxis nicht immer. Die Spiegel sind meist Konvexspiegel, um eine weitwinklige Ansicht zu ermöglichen. Je nach Gabelstapler und Einsatz werden auch Außenspiegel verwendet.

3.4 Assistenzsysteme

Assistenzsysteme sind technische Systeme, die einen Benutzer bei einer bestimmten Tätigkeit innerhalb eines übergeordneten technischen Systems unterstützen. Assistenzsysteme, die bei der Bedienung von Transportmitteln wie z. B. Flurförderzeugen oder PKW unterstützen, werden Fahrerassistenzsysteme (FAS) genannt. Im PKW-Bereich werden FAS in „konventionelle FAS“ und „FAS mit maschineller Wahrnehmung“ unterteilt [Win-2012]. Vor allem moderne Systeme wie Abstand- und Spurhaltesysteme fallen unter letztere Kategorie. Bei Flurförderzeugen wird keine Unterteilung vorgenommen.

Ausgehend vom Inhalt einer Assistenzinformation können nach Kraiss vier Assistententypen unterschieden werden [Kra-1998]:

- Informierende Assistenten
- Beratende Assistenten
- Kommandierende Assistenten
- Intervenierende Assistenten

Die Eigenschaften dieser Assistententypen werden in Tabelle 3-1 erläutert. FAS für PKW werden in der Literatur auch in die Kategorien Information, Warnung und Eingriff unterteilt [Rei-2010, Tho-2010].

Tabelle 3-1: *Assistenztyp und charakteristische Eigenschaften von Assistenzfunktionen nach Kraiss [Kra-1998]*

Assistenztyp	Charakterisierung
Information	<ul style="list-style-type: none"> - Statisches Informationssystem, d. h. keine situationsabhängige Informationsfilterung - Passiv, d. h. keine autonomen Meldungen
Beratung	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptives Informationssystem, d. h. situationsabhängige Information und Handlungsvorschläge - Beanspruchungsabhängige Form und Modalität der Informationsdarstellung
Kommando	<ul style="list-style-type: none"> - Situations- und benutzerabhängige Weisungen in Kommandoform - aus Zeitmangel nicht überprüfbar - Übersteuerbar
Intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Situations- und benutzerabhängige Limitierung von Benutzereingaben - zum Teil übersteuerbar

Voraussetzung dieser Typeneinteilung ist eine redundant-parallele Funktionsteilung von Mensch und Maschine. D. h., dass Mensch und Maschine parallel die gleiche Aufgabe bearbeiten. Es gibt aber auch Systeme, die auf eine Aktivierung durch den Menschen eine Aufgabe allein bearbeiten. Solche Systeme werden umgangssprachlich ebenfalls Assistenzsysteme genannt, sind es streng nach [Kra-1998] aber nicht. In dieser Forschungsarbeit wird ihr Typ als Automat oder automatisiertes Assistenzsystem bezeichnet.

3.4.1 Beziehung zwischen AR-Systemen und Assistenzsystemen

AR-Systeme verfügen über eine gewisse Schnittmenge mit Assistenzsystemen. Ein AR-System ist dann ein Assistenzsystem, wenn es dem Benutzer Informationen im Kontext seiner aktuellen Tätigkeit darstellt. Der Assistenztyp kann dabei informierend, beratend oder kommandierend sein. Informierende und beratende Systeme zielen tendenziell auf eine Effizienzsteigerung ab. Kommandierende Systeme sind durch extremen Zeitdruck gekennzeichnet [Kra-1998] und sind daher für sicherheitsrelevante Informationen geeignet. Der intervenierende Assistenztyp wird durch ein AR-System nicht abgebildet.

Automatisierte Assistenzsysteme haben keine Beziehung zu AR-Systemen, da sie

für die Ausführung ihrer Aufgabe keine Informationen an den Benutzer übermitteln oder von ihm einholen müssen. Sie werden lediglich vom Benutzer aktiviert.

3.4.2 Assistenzsysteme im Flurförderzeug

Für Flurförderzeuge existieren Assistenzsysteme aller vier oben beschriebenen Typen. Intervenierende Assistenzsysteme besitzen nicht zwangsläufig eine Anzeige. Im Fall eines Eingriffs spürt der Fahrer dies nur am veränderten Fahrzeugverhalten. Die drei anderen Assistenztypen weisen immer eine MMS in Form einer Anzeige von visuellen, akustischen oder haptischen Signalen und Informationen auf. Zusätzlich können sie über Eingabeelemente verfügen.

Automatisierte Assistenzsysteme gibt es ebenfalls. Ein Beispiel dafür ist die Hubhöhenvorwahl. Der Fahrer muss diese durch Knopfdruck aktivieren und wartet dann ab, bis die programmierte Hubhöhe automatisiert angefahren wird.

Die Assistenzsysteme werden teils von den FFZ-Herstellern selbst entwickelt und verbaut, teils handelt es sich um Nachrüst-Lösungen. Die Systeme können in die nachfolgend aufgelisteten Kategorien unterteilt werden. Die Beispiele in Tabelle 3-2 erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-2: Assistenzsysteme in Gabelstaplern

Kategorie	Beispiele	Typ
Fahrzeugstabilität und Fahrassistenz	<ul style="list-style-type: none"> - Geschwindigkeitsbegrenzung bei Kurvenfahrten oder großen Hubhöhen - Geschwindigkeitsbegrenzung innerhalb von definierten Gebäude- und Gefahrenbereichen - Aktive Lenksynchronisation - Lenkachsstabilisator - Automatische Feststellbremse bei Steigungen 	intervenierend
Lasthandling	<ul style="list-style-type: none"> - Neigewinkelbegrenzung bei Vorwärtsneigung - Neigegeschwindigkeitsreduzierung bei Rückwärtsneigung 	intervenierend
	<ul style="list-style-type: none"> - Neigewinkelvorwahl und Gabelnivellierung - Hubhöhenvorwahl - Stellungsvorwahl des Seitenschiebers 	automatisiert
	<ul style="list-style-type: none"> - Messung der Eintauchtiefe in das Ladehilfsmittel - Lastwaage 	informierend
Staplerleitsystem inkl. Navigation	<ul style="list-style-type: none"> - Übliche SLS-Funktionen - Routenführung - Anzeige von Verkehrsvorgaben 	informierend/ beratend
Lastidentifizierung	<ul style="list-style-type: none"> - RFID-Systeme - Optische Systeme 	informierend
Sichtassistenz	<ul style="list-style-type: none"> - Rückfahrkamera, Gabelzinkenkamera - Kamerasysteme allgemein 	informierend
Kollisionswarnung	<ul style="list-style-type: none"> - Distanzsensorik (Ultraschall, RFID, optisch) 	beratend/ kommandierend

4 Aufgabenanalyse und Entwicklung von Einsatzszenarien

In diesem Kapitel werden die spezifischen Bedingungen für den Fahrer eines Gabelstaplers und seine Aufgaben analysiert. Daraus abgeleitet werden Unterstützungsmöglichkeiten für den Fahrer bestimmt, die zu verschiedenen Einsatzszenarien führen.

4.1 Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers

Um den Einsatz der AR-Technologie im Gabelstapler zielführend zu untersuchen, ist ein umfassendes Verständnis der Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers notwendig. Hierzu wird eine Aufgabenanalyse durchgeführt. Bei zwei Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses wird der Betrieb von Gabelstaplern beobachtet, per Video aufgezeichnet und ausgewertet. Experteninterviews in Form von Gesprächen mit Gabelstaplerfahrern übermitteln individuelles Wissen aus Sicht der Benutzer. Die Unfallverhütungsvorschrift für Flurförderzeuge [BGV D27] der Berufsgenossenschaften beschreibt die gesetzlichen Bestimmungen für den Betrieb von Flurförderzeugen. Zusätzlich geben die Berufsgenossenschaften Handbücher mit Empfehlungen zum Führen von Gabelstaplern heraus (vgl. [BGH-2012]).

4.1.1 Aufgabenanalyse

Zur Aufgabenanalyse wird die Aufgabe des Gabelstaplerfahrers, die Beförderung einer Last von Quelle zu Senke, in Unteraufgaben aufgegliedert. Gliederungskriterium ist die Art der Tätigkeit, auch „Verrichtung“ genannt [Gro-1978]. Schrittweise entsteht so eine hierarchische Gliederung in Hauptaufgabe, Teilaufgabe und Elementaraufgabe. Eine Elementaraufgabe ist nicht mehr in weitere Aufgaben teilbar.

In Abbildung 4-1 ist die Aufgabenanalyse dargestellt. Die vier Hauptaufgaben *Fahraufgabe*, *Betrieb*, *Auftragsabwicklung* und *Lasthandling* werden identifiziert. *Fahraufgabe* und *Lasthandling* besitzen aufgrund der hohen Komplexität weitere Teilaufgaben, *Betrieb* und *Auftragsabwicklung* hingegen nicht. Sie bestehen nur aus Elementaraufgaben.

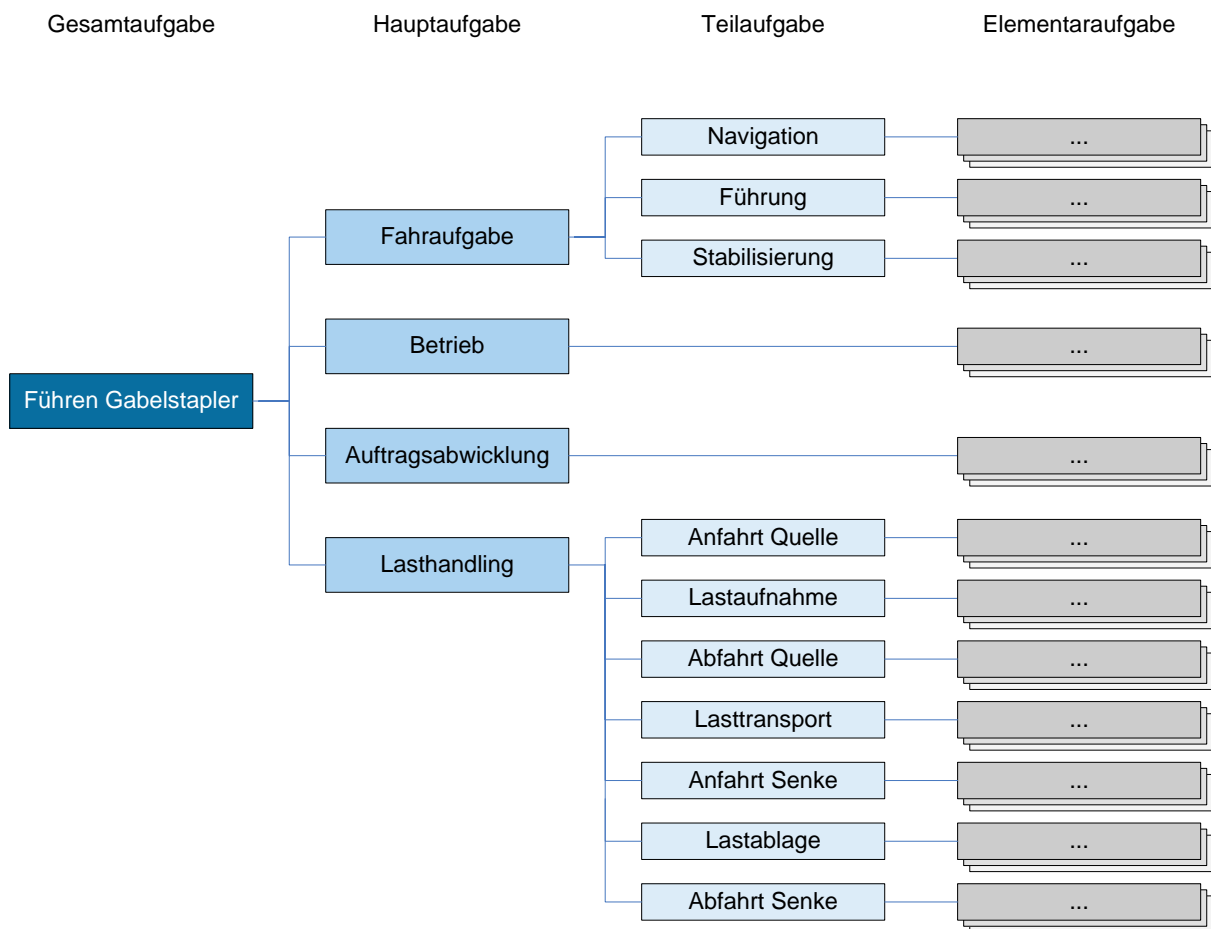


Abbildung 4-1: Analyse der Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers

Anzumerken ist, dass Teilaufgaben der Hauptaufgabe *Lasthandling* (z. B. An- und Abfahrt Quelle/Senke, Lasttransport) auch die Hauptaufgabe *Fahraufgabe* beinhalten, was aber nicht weiter vertieft werden soll. Entscheidend ist in diesen Fällen, dass neben der *Fahraufgabe* weitere Aufgaben absolviert werden müssen (z. B. Kontrolle der Last während des Lasttransports). Eine vollständige Auflistung der Aufgabenanalyse samt Elementaraufgaben findet sich in Anhang A.

Im Folgenden werden die vier Hauptaufgaben näher erläutert.

Fahraufgabe

Die Fahraufgabe gliedert sich nach *Bernotat* in die drei Ebenen Navigation, Führung, Stabilisierung, welche als Teilaufgaben betrachtet werden [Ber-1970].

Die Navigation schließt als Elementaraufgaben die Planung und Wahl einer Fahrrou- te ein. Bei der Planung der Fahrrou- te in einer typischen Arbeitsumgebung von Gabelstaplern (Lager, Produktion, usw.) fließen mehrere Parameter mit ein. Dazu gehören u. a. die Position von Start und Ziel, meist Quelle und Senke der Last, das Lay-

out der Arbeitsumgebung, die Eigenschaften von Gabelstapler und Last, die Breite und die Tragfähigkeit von Verkehrswegen und Gassen sowie die spezifischen Verkehrsregeln der Unternehmen.

Bei der Teilaufgabe Führung wird die geplante Fahrroute umgesetzt. Die Führungsgrößen Sollspur und Sollgeschwindigkeit werden abgeleitet. Der Fahrkorridor wird auf statische und dynamische Hindernisse sowie Verkehrshinweise kontrolliert, auf die gegebenenfalls reagiert wird.

Die Teilaufgabe Stabilisierung beinhaltet die Kontrolle der Fahrgeschwindigkeit und die Einhaltung der Fahrspur. Diese Regelung wird anhand der in der Führungsebene aufgestellten Führungsgrößen durch Stelleingriffe in Form von Beschleunigen, Bremsen und Lenken ausgeführt.

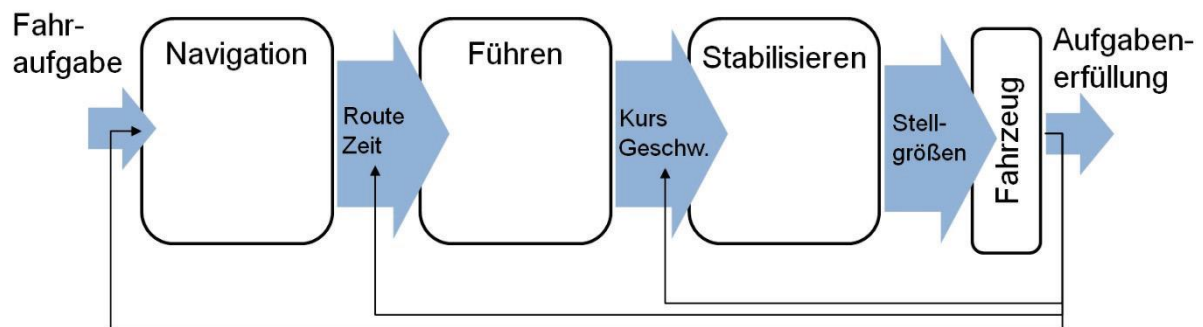


Abbildung 4-2: Teilaufgaben der primären Fahraufgabe (Quelle: [Isr-2012])

Betrieb

Unter der Hauptaufgabe Betrieb werden alle Aufgaben zusammengefasst, die nicht direkt mit den Primärfunktionen eines Gabelstaplers, Fahren und Fördern, zusammenhängen. Dazu gehören die Kontrolle von Betriebszuständen und Warnmeldungen, das Bedienen von Beleuchtung, Scheibenwischer, Komfortfunktionen (Heizung, Klima, Radio) sowie von Authentifizierungssystemen und Rückhaltesystemen (Gurt). Das Laden der Batterie bzw. das Auffüllen des Treibstoffs zählt ebenfalls dazu.

Auftragsabwicklung

Die Hauptaufgabe Auftragsabwicklung beinhaltet außer dem Lasttransport als solches alle Vorgänge zum Abarbeiten eines Auftrags. Angefangen beim Einholen und Annehmen von Aufträgen geht dies über die Identifikation von Ware bis hin zur Quittierung der Aufträge. Firmenspezifische Bearbeitungsschritte an der Ware oder am Ladehilfsmittel sind inbegriffen.

Lasthandling

Bei der Aufgabenanalyse wird ein Einzelspiel betrachtet. Die Elementaraufgaben sind soweit abstrahiert, dass der Einlagerungs- und Auslagerungsvorgang unabhängig vom Lagertyp ist. Das Einzelspiel teilt sich in sieben Teilaufgaben, die samt Elementaraufgaben in Abbildung 4-3 aufgelistet sind. Wie oben beschrieben zählt auch die Fahraufgabe selbst zu den Elementaraufgaben beim Lasthandling. Diese sind der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, werden aber entsprechend grau gekennzeichnet.

Die Arbeitsweise von Gabelstaplerfahrern unterliegt individuellen Fähigkeiten und Präferenzen. Um eine möglichst allgemeingültige Aufgabenanalyse durchzuführen, werden bei der vorliegenden Zerlegung des Lasthandlings in Elementaraufgaben Empfehlungen aus der Literatur berücksichtigt [Kau-2011]. Die Elementaraufgaben sind in einer chronologisch günstigen Arbeitsweise aufgereiht. Die Reihenfolge ist allerdings nicht zwingend bindend. Zudem kann die Durchführung einiger Aufgaben auch parallel erfolgen. Erfahrene Gabelstaplerfahrer betätigen beispielsweise bei einem Auslagerungsvorgang vor dem Eintauchen in eine Palette die Einstellung der Mastneigung und der Hubhöhe oft gleichzeitig.

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass keine automatisierten Assistenzsysteme am Gabelstapler verbaut sind und der Fahrer alle Vorgänge zum Positionieren der Gabelzinken und ggf. zum Einstellen des Abstands der Gabelzinken zueinander eigenhändig vornimmt.

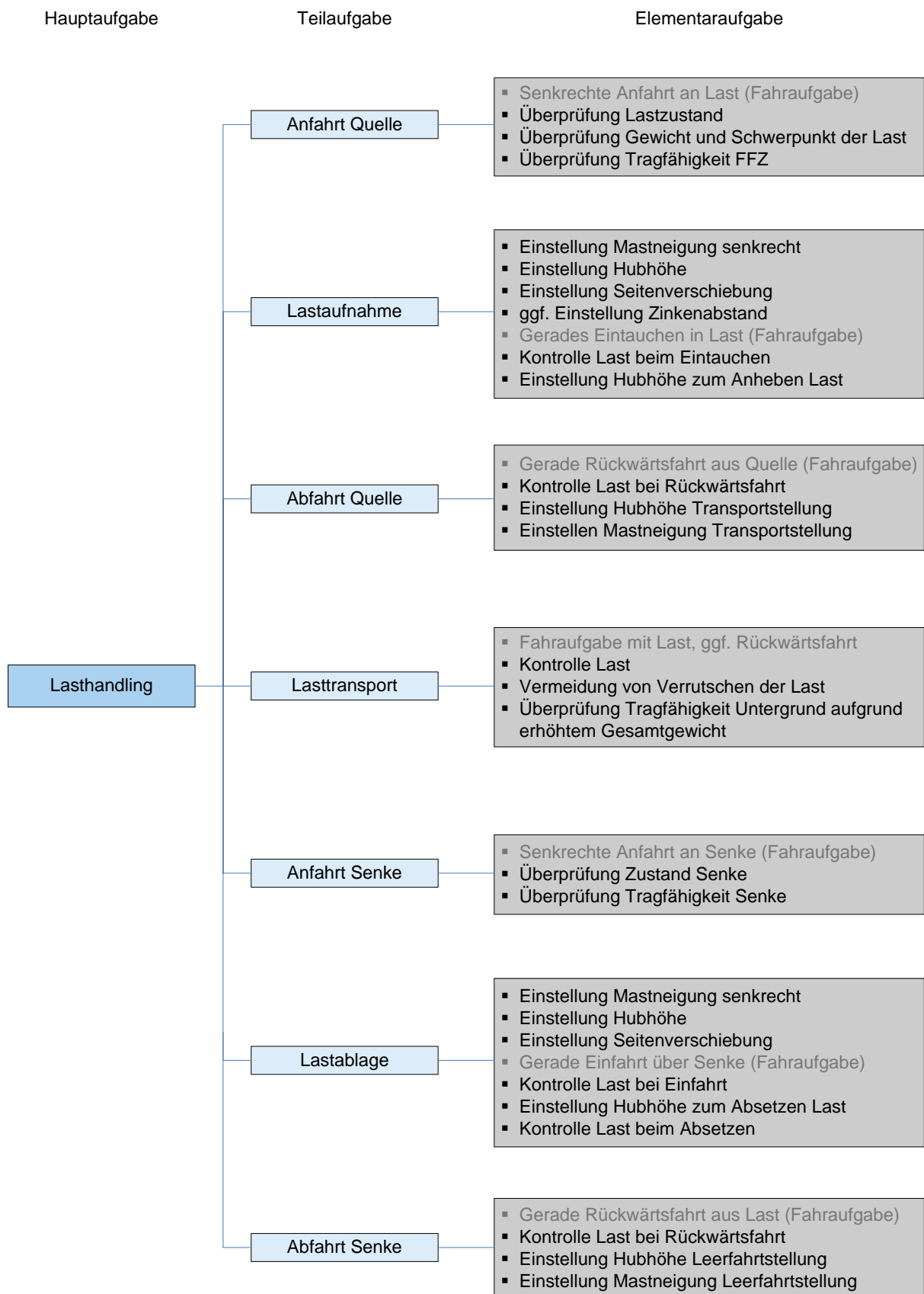


Abbildung 4-3: Aufgliederung der Hauptaufgabe Lasthandling in einem Einzelspiel

4.1.2 Klassifizierung der Elementaraufgaben

Die Elementaraufgaben können in Anlehnung an Rouse und Hollnagel nach kognitiven Gesichtspunkten klassifiziert werden [Rou-1981, Hol-1998]. Dafür werden vier kognitive Aktivitäten identifiziert, die die unterschiedlichen Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers beschreiben:

- Überwachung
- Planung
- Bedienung/Steuerung
- Regelung

Die Klassifizierung ist in der vollständigen Aufgabenanalyse in Anhang A dargestellt. Hier soll eine kurze Zusammenfassung stehen.

Bei der Fahraufgabe überwiegen in den Teilaufgaben Navigation und Führung vor allem Aufgaben, die einer Überwachung oder Planung entsprechen. In der Teilaufgabe Stabilisierung finden sich Überwachungs- und Regelungsvorgänge.

Der Betrieb und die Auftragsabwicklung sind vor allem von Aufgaben vom Typ Bedienung/Steuerung geprägt.

Das Lasthandling beinhaltet vorwiegend Regelungsvorgänge. Dies ist auf die Bedienung der Hydraulik zum Positionieren der Gabelzinken bzw. des Hubmastes zurückzuführen. Überwachungsaufgaben finden ebenfalls statt, da die Last und die unmittelbare Lagerumgebung bei vielen Arbeitsschritten beobachtet werden muss, um ein ungewolltes Verschieben, Verhaken oder Abstürzen der Last zu verhindern.

4.1.3 Experten-Interviews

Neben der Analyse des Einsatzes von Gabelstaplern bei den zwei Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses wurden zusätzlich insgesamt sechs Experten-Interviews mit Gabelstaplerfahrern durchgeführt. Die Fahrer wurden zu den Unterstützungsmöglichkeiten beim Einsatz von Gabelstaplern befragt und konnten sich Unterstützungsfunktionen wünschen, die sie gerne verwenden würden. Aufgrund der geringen Stichprobe von sechs Personen soll hier nur eine Tendenz festgestellt werden.

Eine Unterstützung bei den Hauptaufgaben Betrieb und Auftragsabwicklung ist laut der befragten Personen nicht nötig.

Bei der Fahraufgabe besteht große Nachfrage nach Systemen, die Personen und andere Flurförderzeuge im Umfeld des Gabelstaplers erkennen und rechtzeitig vor einer Kollision warnen. Eine Unterstützung bei der Navigation wird nicht benötigt.

Eine Unterstützung beim Lasthandling wird vor allem bei der Aufnahme der Last als sinnvoll betrachtet, besonders bei Arbeiten in großen Höhen.

4.2 Vorüberlegung zur Entwicklung von Einsatzszenarien

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird untersucht, welches Potenzial die Augmented-Reality-Technologie als Unterstützung für den Fahrer von Gabelstaplern hat. In Kapitel 4.1 sind die einzelnen Aufgaben, die ein Gabelstaplerfahrer zu absolvieren hat, aufgelistet. Im nächsten Schritt soll betrachtet werden, bei welchen Aufgaben die Möglichkeit zur Unterstützung besteht. Bevor jedoch die Einsatzszenarien entwickelt werden, werden zwei Vorüberlegungen diskutiert.

4.2.1 Strategie

Die exakte Überlagerung von virtuellen Objekten mit der realen Umgebung ist nach wie vor technisch sehr schwer umsetzbar. Eine kongruente AR-Darstellung ist mit hohen Kosten in Form von präzisiertem Tracking und hoher Rechenleistung verbunden. Im statischen Anwendungsfall ist es machbar, dem Benutzer eine zufriedenstellende Visualisierung darzustellen. Der Einsatz von Gabelstaplern ist aber durch eine hohe Dynamik gekennzeichnet. Der Gabelstapler befindet sich für einen großen Anteil einer Arbeitsschicht in Fahrt. Während des Lasthandlings bewegen sich die Gabel und der Hubmast. Bewegte Objekte sind schwieriger zu tracken als ruhende Objekte, da für die Posenermittlung im schlechtesten Fall nur eine Messung bzw. Aufnahme gegeben ist, bevor das Objekt seine Pose ändert. Ein weiterer, erschwerender Effekt ist, dass der Mensch Latenzen in der Visualisierung als erhebliche Störung empfindet. Die visuelle Sinneswahrnehmung registriert sehr schnell, wenn virtuelle Objekte der realen Umgebung nachlaufen.

Nicht ohne Grund gibt es bisher keine vergleichbaren AR-Systeme in anderen Fahrzeugbereichen oder in der forschungsintensiven Automobilindustrie. Als Konsequenz liegt in diesem Forschungsprojekt der Fokus nicht auf einer kongruenten Informationsdarstellung sondern auf einer kontextabhängigen Informationsdarstellung im Sichtfeld des Gabelstaplerfahrers unter Berücksichtigung ergonomischer Gesichtspunkte.

4.2.2 Zielgruppe

Grundsätzlich gilt, dass erfahrene Gabelstaplerfahrer weniger Unterstützung benötigen als unerfahrene Fahrer. Bei der Entwicklung von Einsatzszenarien soll deswegen berücksichtigt werden, dass zwischen unterschiedlichen Benutzergruppen für das AR-System differenziert werden sollte.

Zur Untersuchung des Potenzials von AR als Unterstützung kann es von Vorteil sein, auf eine im Umgang mit Gabelstaplern weniger erfahrene Nutzergruppe zu zielen, damit die mögliche Unterstützungshöhe größer ist. Die Zielgruppe setzt sich aus folgenden Arbeitern zusammen:

- Mitarbeiter, die aufgrund der Arbeitsorganisation im Unternehmen gelegentlich Gabelstapler benutzen
- Mitarbeiter in Job Rotation
- Leiharbeiter

4.3 Einsatzszenarien

Im Folgenden werden sechs Einsatzszenarien vorgestellt. Die Erläuterung der Szenarien ist jeweils in folgende Abschnitte aufgeteilt:

- Umsetzungsmöglichkeit
- Equipment
- Einschätzung

Manche Szenarien werden durch Beispiele verdeutlicht.

4.3.1 Szenario 1: Navigationsanzeige

Der Gabelstaplerfahrer wird durch das Lager oder den Produktionsbereich zu seinem nächsten Ziel, welches vom Staplerleitsystem vorgegeben wird, navigiert.

Umsetzungsmöglichkeit

Der Fahrer wird durch Einblendung von Richtungsanzeigen bei der Wahl seiner Fahrroute unterstützt. Die Route kann beispielsweise über Pfeildarstellungen angegeben werden. Möglich ist auch eine Anzeige des Grundrisses der Arbeitsumgebung. Zusätzlich können Informationen zu Engstellen, Durchfahrtshöhen oder aktuell blockierten Wegen und Gassen angezeigt werden. Bereichsspezifische Tempolimits und andere Verkehrsregeln werden signalisiert.

Benötigtes Equipment

Für die Positionsbestimmung des Gabelstaplers wird ein Realtime Locating System (RTLS) benötigt. Es gibt verschiedene Ausprägungen dieser Systeme. Die Wahl ist abhängig von Bedingungen am Einsatzort und der geforderten Genauigkeit [AIM-2014].

Die Routenführung und die Generierung der Zusatzinformationen übernimmt ein Navigationssystem, welches in ein Staplerleitsystem integriert ist oder eine Schnittstelle dazu besitzt. Staplerleitsysteme mit Navigationsmodul sind bereits auf dem Markt erhältlich.

Einschätzung

Die Navigationsanzeige ist vor allem für ortsfremde Arbeiter hilfreich (Leiharbeiter, Job Rotation). Aufgrund der Vermeidung von Umwegen und blockierten Routen wird die Effektivität gesteigert und die Fahrzeit kann eingespart werden. Für die Evaluierung des Szenarios können Fahraufträge vorprogrammiert werden. Ein SLS ist in diesem Schritt für die Realisierung des Einsatzszenarios nicht notwendig.

Beispiel

Für die Pfeildarstellung und weitere Symbolik wird nach ergonomischen Gesichtspunkten die für den Fahrer optimale Anzeigeposition festgelegt und kontextbezogen dargestellt. Eine Anlehnung der Konzepte zur Zusatzinformation (Engstelle, Durchfahrthöhe) an standardisierte Verkehrszeichen ist aus ergonomischer Sicht sinnvoll. Zur Berechnung der Zeichengröße werden Normen und Arbeitsstättenrichtlinien herangezogen, die in 6.2.2.1 genauer beschrieben werden.

4.3.2 Szenario 2: Kollisionswarnung

Hindernisse, die sich im Fahrweg des Gabelstaplers befinden und für den Fahrer schlecht oder gar nicht sichtbar sind, werden angezeigt, so dass der Fahrer frühzeitig gewarnt ist und einer Kollision entgegenwirken kann. Die Rückwärtsfahrt ist ein wesentlicher Bestandteil des Szenarios.

Umsetzungsmöglichkeit

Verschiedene Hindernisse werden über Sensoren erkannt und klassifiziert. Es wird zwischen statischen (Ladehilfsmittel, andere Gegenstände) und dynamischen Hindernissen (Menschen, bewegte FFZ) unterschieden. Durch eine geeignete, ergonomische Darstellung wird dem Fahrer die Position bzw. die Richtung des Hindernisses vermittelt. Der Hinweis kann über eine Einrahmung des Hindernisses oder einer kontextbezogene Richtungsangabe in der Art einer LED-Leiste in der Scheibenwur-

zel (Abbildung 4-4) realisiert werden. Eine Überblicksdarstellung (Sicht von oben auf das Flurförderzeug) wäre bei Wahl des Szenarios eine weitere zu überdenkende Möglichkeit. Die RTLS-Positionsdaten anderer FFZ können ebenfalls verwendet werden, um bevorstehende Kollisionen zu identifizieren und zu vermeiden.

Benötigtes Equipment

Für dieses Szenario ist ein System notwendig, welches verlässlich Hindernisse in der Umgebung des Gabelstaplers registriert. Gängige Systeme basieren vor allem auf einer optischen oder akustischen (Ultraschall) Distanzmessung. Bei zusätzlicher Verwendung von Positionsdaten wird ein RTLS benötigt.

Einschätzung

Grundsätzlich ist dieses Szenario abhängig von der Qualität der Sensorik zur Hinderniserkennung. Mithilfe der kontextbezogenen Darstellung von Hindernissen – beispielsweise in der Art einer Leiste in der Scheibenwurzel – könnten Kollisionen und Sachschäden entgegengewirkt werden.

Beispiel



Abbildung 4-4: LED-Anzeige in der Scheibenwurzel (Quelle: [Küh-2003])

4.3.3 Szenario 3: Kritischer Betriebszustand

Kritische Betriebszustände werden dem Fahrer direkt in das Sichtfeld eingeblendet.

Umsetzungsmöglichkeit

Befindet sich ein Betriebszustand in einem kritischen Bereich, wird dieser dem Fahrer direkt im Sichtbereich als Warnmeldung angezeigt.

Benötigtes Equipment

Um fahrzeuginterne Daten darzustellen, müssen sie über eine Schnittstelle zum Bordnetz (z. B. CAN-Interface) abgegriffen werden.

Einschätzung

Im Gegensatz zu einer konventionellen Anzeige bietet der direkte Hinweis im Sichtbereich des Fahrers den Vorteil, dass Warnungen vom Fahrer schneller erfasst werden können. Zusammenfassend ist kein wesentlicher Mehrwert zu erkennen.

4.3.4 Szenario 4: Auftragsdaten und Lastinformation

Der Fahrer wird über den aktuellen Auftrag informiert. Wichtige Eigenschaften der Last wie zum Beispiel „zerbrechlich“ werden angezeigt.

Umsetzungsmöglichkeit

Zunächst erfolgt die Anzeige des Auftrags bzw. der Quelle (z. B. über Regal- und Teilenummer). Im Anschluss an die Identifikation erhält der Fahrer Informationen zu den Lastdaten (Gewicht, Lastart) sowie der Senke (Regalnummer). Zusätzlich werden bei empfindlicher Last entsprechende Warnmeldungen gegeben.

Benötigtes Equipment

Ein Staplerleitsystem für die Auftragsvergabe wird benötigt. Eigenschaften der Last werden aus einem Lagerverwaltungssystem abgerufen, die dort hinterlegt sein müssten.

Einschätzung

Dieses Szenario kann ein Staplerterminal ersetzen und verbessert somit die Sichtverhältnisse nach außen. Die Machbarkeit ist gegeben.

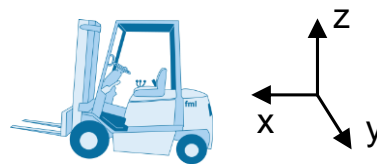
4.3.5 Szenario 5: Virtuelle Gabel

Der Gabelstaplerfahrer wird beim Positionieren der Gabel während eines Ein- oder Auslagerungsvorganges unterstützt.

Umsetzungsmöglichkeit

Zur Unterstützung bei der Positionierung der realen Gabelzinken wird dem Fahrer eine virtuelle Gabel dargestellt. Diese Anzeige ist nicht kongruent. Die Virtuelle Gabel überlagert dementsprechend nicht deckungsgleich die reale Gabel des Gabelstaplers. Vielmehr soll dem Fahrer vermittelt werden, in welcher Lage sich die Gabel samt Hubmast relativ zu einem Lagerplatz befindet.

Dazu werden vier Teilaspekte betrachtet, wie Abbildung 4-5 verdeutlicht. Die Mastneigung wird absolut dargestellt. Mit Hilfe einer Referenz wird markiert, wann sich der Hubmast in der Senkrechten befindet und damit die Gabelzinken waagrecht eingestellt sind. Die Anzeige der Hubhöhe, der Seitenverschiebung und der Eintauchtiefe wird relativ zum Ladehilfsmittel bzw. zu einem Lagerplatz realisiert. Damit weiß der Fahrer, wie weit er die Gabel oder den Gabelstapler in die entsprechende Richtung bewegen muss. Die Anzeige auf dem Visualisierungsmedium ist fortlaufend so zu positionieren, dass sie dem Blick des Staplerfahrers auf die reale Gabel folgt. Bewegt sich die Gabel nach oben, soll auch die Anzeige der Virtuellen Gabel eine analoge Bewegung vollziehen.



	Anzeige der	Positionierung der Gabel
Virtuelle Gabel I	Mastneigung	in der xz-Ebene
Virtuelle Gabel II	Hubhöhe	in z-Richtung, vertikal
Virtuelle Gabel III	Seitenverschiebung	in y-Richtung, horizontal
Virtuelle Gabel IV	Eintauchtiefe	in x-Richtung, horizontal

Abbildung 4-5: Die vier Elemente der Virtuellen Gabel

Benötigtes Equipment

Zur Lagebestimmung der Gabel ist eine Sensorik mit einer hinreichenden Genauigkeit erforderlich, um die Gabelzinken sicher in das Ladehilfsmittel eintauchen bzw. die Gabelzinken samt Ladehilfsmittel über einem Lagerplatz positionieren zu können. Die Mastneigung und die Hubhöhe können absolut gemessen werden. Es wird davon ausgegangen, dass Ein- und Auslagervorgänge nur auf Ebenen durchgeführt werden, so dass ein senkrechter Hubmast immer parallel zum Regal und zur Schwerkraft ausgerichtet ist. Die Hubhöhe kann absolut gemessen werden, weil die Hubhöhe und die Lagerhöhe (z-Koordinate in Abbildung 4-5) der Ladehilfsmittel in Regalen oder Stapeln den selben Bezugspunkt haben. Die Höhe wird immer zum Boden gemessen. Diese absolute Messung kann sowohl mit mechatronischen, magnetischen und optischen Systemen als auch mit Trackingsystemen umgesetzt werden. Erstere Sensoren werden gelegentlich in Serie verbaut. Im Forschungsprojekt *Das Staplerauge* [Gün-2014a], welches am Lehrstuhl fml durchgeführt wurde, wird eine Messung der Hubmastneigung und der Hubhöhe durch ein Marker-

Kamera-Tracking realisiert. Dieses System steht für die Bearbeitung des vorliegenden Projekts zur Verfügung.

Die Seitenverschiebung und die Eintauchtiefe müssen relativ ermittelt werden. Der Gabelstapler und die Ladehilfsmittel bzw. Lagerplätze besitzen keine gemeinsame Referenz in der xy-Ebene. Um eine geometrische Beziehung zu ermitteln, bietet sich hier ein Tracking an. Beispielsweise wird am Gabelstapler eine Kamera angebracht und am Ladehilfsmittel bzw. am Lagerplatz ein Marker, so dass die Lage zueinander berechnet werden kann. Die Kamera muss die selben Bewegungen wie die Gabelzinken vollziehen. Um dem Fahrer darstellen zu können, wie weit er die Gabelzinken seitlich entlang der y-Achse zu verfahren hat, muss die Kamera also am Gabelträger oder den Gabelzinken installiert werden. Für dieses Tracking kann ebenfalls auf Ergebnisse des oben genannten Forschungsprojekts zurückgegriffen werden.

Einschätzung

Eine Anzeige der Hubmastneigung kann dem Fahrer bei der senkrechten Einstellung des Hubmasts Hilfestellung leisten. Eine Anzeige der Hubhöhe unterstützt sowohl bei der exakten Positionierung der Gabel als auch bei der Fehlervermeidung, in dem die richtige Regalebene hervorgehoben wird und nicht fälschlicherweise eine niedriger oder höher gelegene Ebene. Die Darstellung der Seitenverschiebung kann bei Ein- und Auslagervorgängen in großen Höhen von Vorteil sein, weil eine genaue Abschätzung ohne technische Hilfsmittel sehr schwierig ist. Die Eintauchtiefe muss vor allem beachtet werden, wenn die Gabelzinken länger als das Ladehilfsmittel sind oder das Ladehilfsmittel quer aufgenommen wird. Werden die Gabelzinken über das Ladehilfsmittel heraus gefahren, können dahinter befindliche Last oder sonstige Gegenstände verschoben oder beschädigt werden.

4.3.6 Szenario 6: Markierung der Quelle und Senke

Quelle und Senke eines Auftrags werden markiert.

Umsetzungsmöglichkeit

Aus in Kapitel 4.2.1 genannter Begründung wird nicht auf eine kongruente Darstellung mit einer exakten Überlagerung von virtuellen Objekten über der realen Umgebung abgezielt. Dennoch beschreibt dieses Szenario die größte Näherung an eine kongruente Darstellung. Mit einer Markierung des Lagerplatzes von Quelle und Senke über eine virtuelle Pfeil- oder Balkendarstellung wird dem Fahrer der korrekte Ort mitgeteilt, den er anfahren soll.

Benötigtes Equipment

Die virtuellen Daten müssen auf der Sichtachse zwischen Fahreraugen und Lagerplatz eingeblendet werden. Dafür muss die Position des FFZ, des Fahrerkopfes innerhalb der Kabine sowie des Lagerplatzes ermittelt werden. Eine realistische Möglichkeit ist ein zweifaches Tracking. Zum einen wird die Position des Gabelstaplers zum Lagerplatz getrackt. Dies kann analog zum Tracking in Szenario 5 mit einer am Gabelstapler installierten Kamera und mit Markern versehenen Lagerplätzen umgesetzt werden. Zum anderen muss der Fahrerkopf bzw. die Augen des Fahrers in der Kabine getrackt werden. Dies kann beispielsweise mit 2D oder 3D-Kameras realisiert werden.

Für die Evaluierung des Szenarios können Fahraufträge vorprogrammiert werden. Ein SLS ist in diesem Schritt für die Realisierung des Einsatzszenarios nicht notwendig.

Einschätzung

Die Unterstützung für den Fahrer besteht in erster Linie darin, das Anfahren eines falschen Lagerplatzes zu vermeiden. Dies kann für ortsfremde oder abgelenkte Arbeiter von Vorteil sein.

Das Szenario ist technisch sehr anspruchsvoll, da ein sehr genaues Trackingsystem benötigt wird.

4.4 Auswahl des Einsatzszenarios

Für die weitere Untersuchung des Einsatzes von AR im Flurförderzeug wird dasjenige Szenario identifiziert, welches den größten Mehrwert gegenüber konventionellen Anzeigen bietet. Für den Auswahlprozess werden zunächst Bewertungskriterien definiert. Anschließend wird ein Szenario bestimmt, anhand dessen das Forschungsvorhaben in einem Demonstrator technisch realisiert wird.

4.4.1 Bewertung der Einsatzszenarien

Um die Auswahl des Einsatzszenarios zu systematisieren, werden die drei Kriterien Nutzen, Machbarkeit und AR-Relevanz als Entscheidungsgrundlage definiert. Die einzelnen Szenarien werden anhand dieser Kriterien in drei Stufen (gering, mittel, groß) bewertet, wie in Tabelle 4-1 dargestellt.

Gesamtnutzen

Der Gesamtnutzen des Einsatzszenarios wird betrachtet. So wird der Nutzen einer Navigationsanzeige nur als mittel bewertet, da Lager meist sehr einfach aufgebaut sind und selbst neue Mitarbeiter sich schnell einfinden. Betriebszuständen wird keine hohe Priorität beigemessen, was zu der Bewertung gering führt. Alle weiteren Szenarien besitzen einen großen Nutzen.

Machbarkeit

In dieses Kriterium gehen technische Machbarkeit und Kosten mit ein. Für die Navigation ist ein kostenintensives RTLS nötig, was zu einer mittleren Bewertung führt. Das Szenario Kollisionswarnung benötigt eine zuverlässige Abstandssensorik. Es besteht die Gefahr einer zu großen Fokussierung auf die Integration einer Sensorik anstatt eines AR-Systems. Bei dem Szenario Markierung Lagerplatz hingegen ist die technische Machbarkeit des AR-Systems aufgrund der Annäherung an eine kongruente Darstellung als sehr gering einzuschätzen.

Tabelle 4-1: Bewertung der Einsatzszenarien

Szenario	Gesamtnutzen	Machbarkeit	AR-Relevanz
Navigation	○	○	+
Kollisionswarnung	+	-	+
Betriebszustand	-	+	-
Auftragsdaten	+	+	-
Virtuelle Gabel	+	+	+
Markierung Lagerplatz	+	-	+

+ groß ○ mittel - gering

AR-Relevanz

Dieses Kriterium beurteilt, in wie weit für das jeweilige Szenario eine AR-Anwendung notwendig ist. Entscheidende Fragestellung ist hierbei: „Wird eine kontextabhängige Informationsdarstellung im Sichtbereich benötigt?“ Bedingungen, die eine solche Informationsdarstellung fordern, sind entweder zeitlicher oder räumlicher Dimension.

Die zeitliche Bedingung ergibt sich daraus, wie schnell eine Information angezeigt werden muss. Im Szenario Kollisionswarnung muss die Information unmittelbar angezeigt werden. Es besteht eine große Notwendigkeit einer Darstellung im Sichtbereich. Die Navigationsdaten müssen frühzeitig angezeigt werden, damit der Fahrer reagieren kann. Eine schnelle Informationsaufnahme ist auch in diesem Szenario wichtig. Beim Szenario Virtuelle Gabel wird die Informationsaufnahme ebenfalls beschleunigt, wenn sie im Sichtbereich erfolgt und nicht auf einer Anzeige, bei der der Fahrer seinen Blick von der Last abwenden muss. Bei diesen drei Szenarien sind bereits nur die zeitlichen Vorgaben hinreichend für eine AR-Relevanz.

Räumliche Vorgaben sind gegeben, wenn die Information nur genau an einem bestimmten Ort dargestellt werden kann. Für das Szenario Markierung Lagerplatz ist eine Darstellung der virtuellen Information am realen Lagerplatz Voraussetzung. Beim Szenario Virtuelle Gabel ist eine Darstellung in Richtung der Last notwendig, weil der Fahrer die Last beim Handling immer im Blick haben sollte. Bei der Navigation gilt dies leicht abgeschwächt. Der Fahrer muss seine Aufmerksamkeit auf den Verkehr richten, kann also seinen Blick nicht abwenden zu einer Anzeige, die sich nicht im Sichtbereich befindet. Die Kollisionswarnung hingegen ist nicht an einen bestimmten Ort gebunden. Sie muss lediglich sichtbar sein, unabhängig an welcher Stelle genau.

Die Anzeige von Betriebszuständen oder von Auftragsdaten unterliegt keinen besonderen Vorgaben und hat daher keine AR-Relevanz.

4.4.2 Virtuelle Gabel

Das Szenario Virtuelle Gabel wird als einziges in allen drei Kriterien maximal bewertet und schneidet somit am besten ab. Der Demonstrator wird anhand dieses Szenarios konzipiert und entwickelt. Bevor in den nächsten Kapiteln auf die technische Umsetzung und Evaluation eingegangen wird, soll das Szenario bezüglich der Mensch-Maschine-Schnittstelle tiefer beleuchtet werden.

Die Virtuelle Gabel soll als Unterstützung beim Lasthandling wirken. In Kapitel 4.1 sind die Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers genauer analysiert. Beim Lasthandling sind vom Fahrer vorwiegend Regelungsaufgaben und Kontrollaufgaben durchzuführen. Das zielgenaue Verfahren der Gabel und des Hubmasts wird durch Regelungsvorgänge abgebildet. Die Kontrollaufgaben laufen dazu parallel ab und bestehen aus der Beobachtung der Last und der direkten Umgebung des Lagerplatzes. Die Virtuelle Gabel soll bei der Regelungsaufgabe unterstützen.

Die vier Regelungsaufgaben der Virtuellen Gabel, nachfolgend mit Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung und Eintauchtiefe bezeichnet, sind allesamt manuelle Regelungen. Der Mensch agiert als Regler. *Johannsen* unterscheidet zwischen Regelungen mit direkter und indirekter sensorischer Kontrolle. Bei der direkten sensorischen Kontrolle nimmt der Mensch die Information über Eingangs- und Ausgangsgrößen des Mensch-Maschine-Systems unmittelbar aus der Umgebung wahr [Joh-1993]. Im Anwendungsfall der Hubhöhereinstellung beim Gabelstapler bedeutet dies, dass der Fahrer freie Sicht auf die Gabelzinken hat und somit die Rückführung der Regelgröße Hubhöhe direkt geschieht (siehe Abbildung 4-6).

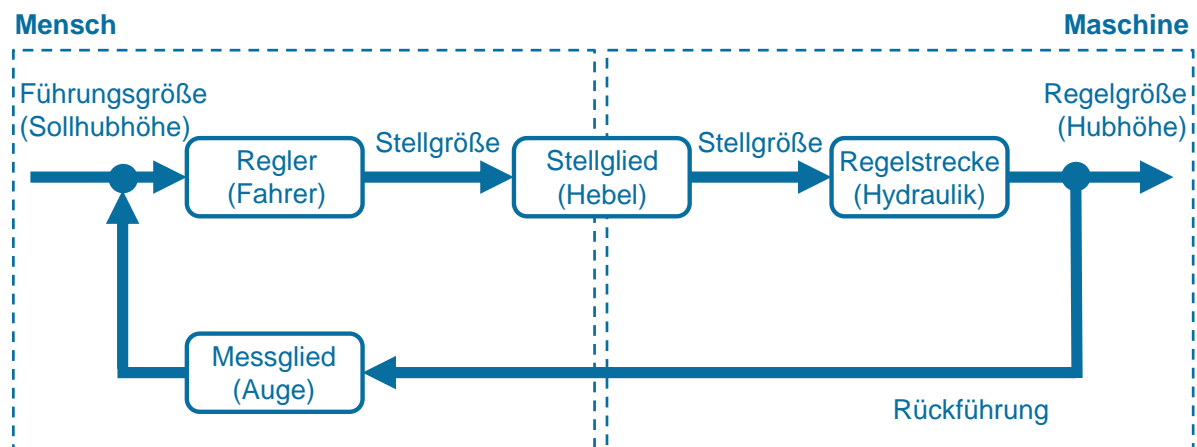


Abbildung 4-6: Manuelle Regelung mit direkter sensorischer Kontrolle

Bei hoher Last sowie bei Ein- und Auslagerungen in großer Höhe ist die Sicht auf die Zinken verdeckt bzw. aufgrund der Entfernung und Perspektive stark beeinträchtigt. Die Rückführung der Regelgröße kann durch eine geeignete Informationsdarstellung erheblich erleichtert werden. In diesem Fall spricht man von einer indirekten sensorischen Kontrolle. Das Einsatzszenario Virtuelle Gabel setzt an diesem Punkt an.

Die Maschine „entdeckt“ und „erkennt“ (Abbildung 4-7) den physischen Zustand der Gabelzinken und des Hubmasts anhand eines Trackingsystems und unterstützt den Menschen bei der Informationsaufnahme. Diese Information wird im Sinne von AR kontextabhängig im Sichtbereich des Fahrers bereitgestellt.

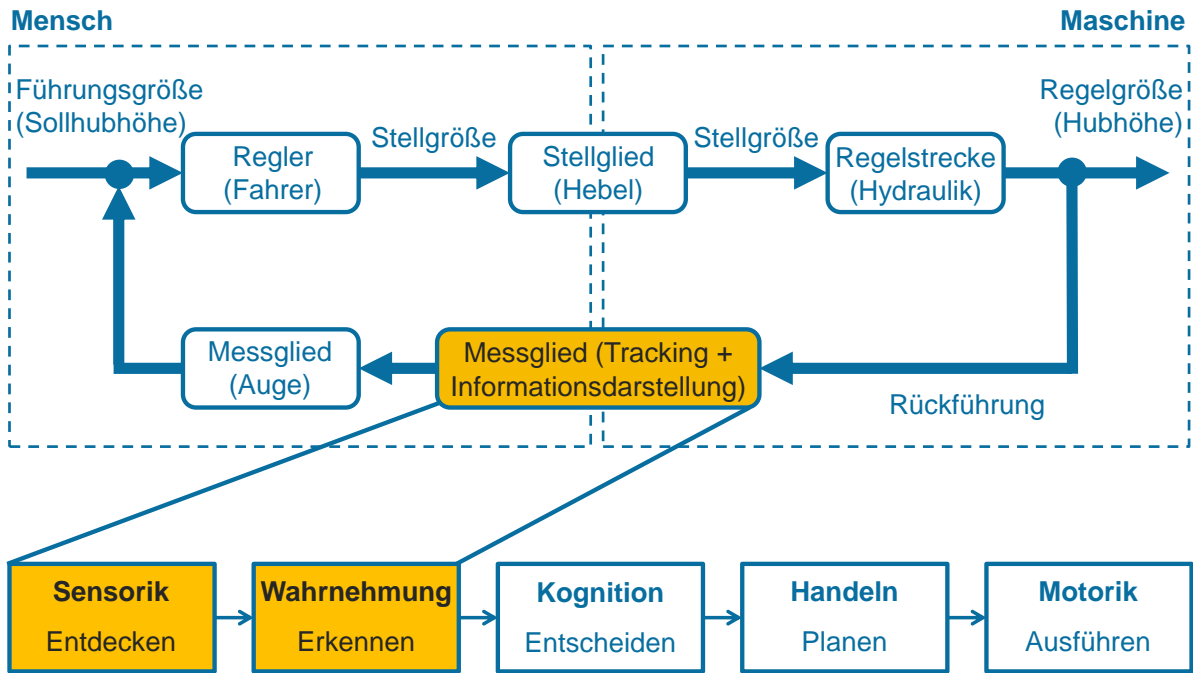


Abbildung 4-7: Manuelle Regelung mit indirekter sensorischer Kontrolle und die fünf Phasen der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung [Züh-2012]

Gelingt diese Rückführung, kann eine hohe Ausführungsgeschwindigkeit bei der Regelung erreicht werden. Die Anwendung von AR-Technologien bietet daher großes Potenzial für manuelle Regelungsvorgänge.

Zu bedenken ist, dass aufgrund der Informationseinblendung im Sichtbereich ein Vermischen von direkter und indirekter sensorischer Kontrolle hervorgerufen werden kann. Dies soll im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter diskutiert werden.

5 Konzeptentwicklung Demonstrator

Das Potenzial der AR-Technologie im Gabelstapler soll anhand des Einsatzszenarios Virtuelle Gabel untersucht werden. Dazu ist der Aufbau eines Demonstrators vorgesehen. Die Konzeptentwicklung für diesen Demonstrator wird in einen technischen und einen ergonomischen Teil aufgliedert. Das technische Konzept beinhaltet die Planung der gesamten Hardwarekomponenten samt Visualisierungsmedium und der einzelnen Software-Module. Es beschreibt ein AR-System, welches im Gabelstapler implementiert wird und dem Fahrer Informationen bereitstellt. Die Art und Weise dieser Informationsbereitstellung, also der Ablauf sowie die Gestaltung und Positionierung der Symbolik, gibt das ergonomische Anzeigekonzept vor. In diesem Kapitel wird das technische Konzept betrachtet.

5.1 Anforderungsanalyse

Basierend auf dem ausgewählten Einsatzszenario wird eine Anforderungsanalyse durchgeführt, die in einer Lastenheftdefinition resultiert. Das Lastenheft ist angelehnt an [Gün-2009]. Die Anforderungen sind gegliedert in:

- Hardware
- Software
- Lasthandling – Virtuelle Gabel
- Akzeptanz
- Sonstiges

Die Anforderungen an Hardware und Software stellen den größten Teil im Lastenheft dar. Die Hardwareanforderungen beinhalten das Visualisierungsmedium und das Trackingsystem samt Kameras sowie die benötigte Peripherie für das AR-System. Analog zur Hardware bestehen Softwareanforderungen an die Visualisierung und das Tracking. Weitere Punkte definieren Kommunikationsschnittstellen und den Aufbau der Software. Durch den Ablauf von Ein- und Auslagervorgängen ergeben sich spezifische Anforderungen zum Einsatzszenario Virtuelle Gabel. Des Weiteren werden im Lastenheft Aspekte zur Benutzerakzeptanz des Systems und sonstige Punkte genannt. Das Lastenheft ist in Anhang B zu finden.

5.2 Visualisierungsmedium

Die Informationsdarstellung im Gabelstapler ist wesentlicher Bestandteil des vorliegenden Forschungsvorhabens. Deswegen kommt der Auswahl des Visualisierungsmediums eine zentrale Rolle zu. Die Festlegung auf ein Visualisierungsmedium muss im ersten Schritt erfolgen, da die Entwicklung des technischen Konzepts und des Anzeigekonzepts davon abhängig ist. Konstruktive Elemente, Datenschnittstellen und Software zur Ansteuerung sowie die Symbolik müssen auf die jeweilige Anzeigetechnik angepasst werden.

Vier Alternativen für ein Visualisierungsmedium werden identifiziert:

- 1) Automobiles Head-up Display
- 2) Datenbrille
- 3) Projection Mapping
- 4) Emissive Projection Display

Die unterschiedlichen Technologien werden im Folgenden dargestellt und auf ihre Tauglichkeit zum Einsatz im Gabelstapler geprüft.

5.2.1 Automobiles Head-up Display

Die Funktionsweise des automobilen Head-up Displays ist bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben. Die konstruktiven Voraussetzungen im PKW sowie der in Fahrtrichtung ausgerichtete Blick des Autofahrers werden sehr gut durch das Prinzip der Spiegelung eines lichtstarken Bildes in der Windschutzscheibe oder einer kleinen zusätzlichen Scheibe (Combiner-HUD), welches dem Fahrer ein über der Motorhaube liegendes virtuelles Bild erscheinen lässt, berücksichtigt. Auf den Gabelstapler kann das System aus zwei Gründen nicht übertragen werden:

- Fast senkrechte Auslegung der Frontscheibe im Gabelstapler
- Sehr kleine Eyebow des Head-up Displays

Damit das virtuelle Bild über der Motorhaube in einem etwas nach unten geneigten Blickwinkel für den Fahrer erscheint, muss sich das Bild auf der Windschutzscheibe geringfügig unterhalb der Fahrerkopfhöhe spiegeln (vgl. Abbildung 5-1). Aufgrund der Schrägstellung der Windschutzscheibe kann die bildgebende Quelle im PKW so verbaut werden, dass sie von unten vertikal nach oben strahlt und im Armaturenbrett versenkt werden kann. Mit einer Senkrechtstellung der Scheibe ist dies nicht zu realisieren. Die Bildquelle müsste von unten mit einem schrägen Winkel auf die Scheibe

strahlen, was dazu führt, dass der Fahrer ebenfalls mit einem schrägen Winkel nach unten schauen müsste, um das virtuelle Bild wahrzunehmen. Gegen das wesentliche Merkmal eines Head-up Displays, dass der Benutzer seinen Kopf oben („up“) und nicht nach unten („down“) hält, wird verstoßen. Man spricht in diesem Fall von einem Head-down Display (HDD) [Abl-2007, Isr-2012]. Eine andere mögliche Variante bei senkrechter Scheibe wäre, die Bildquelle in etwa auf Kopfhöhe zu positionieren, so dass die Bedingung eines nach vorne gerichteten Blickes bei gleichzeitiger Sichtbarkeit des virtuellen Bildes erfüllt ist. Dies würde bedeuten, dass die Bildquelle seitlich neben dem Kopf angebracht werden muss. Dies ist sowohl im PKW als auch im Gabelstapler nicht realistisch umsetzbar. Bewegungsfreiraum, Sicht und auch Komfort wären eingeschränkt. Generell gilt für ein Head-up Display, dass die Position des virtuellen Bildes und der Blickwinkel darauf immer konstant sind, so dass eine Informationsbereitstellung den dynamischen Vorgängen im Gabelstapler nicht folgen kann, z. B. bei einer hoch fahrenden Gabel am Regal. Dies ist aber eine Voraussetzung für die Umsetzung der Hubhöhenanzeige im Einsatzszenario Virtuelle Gabel.

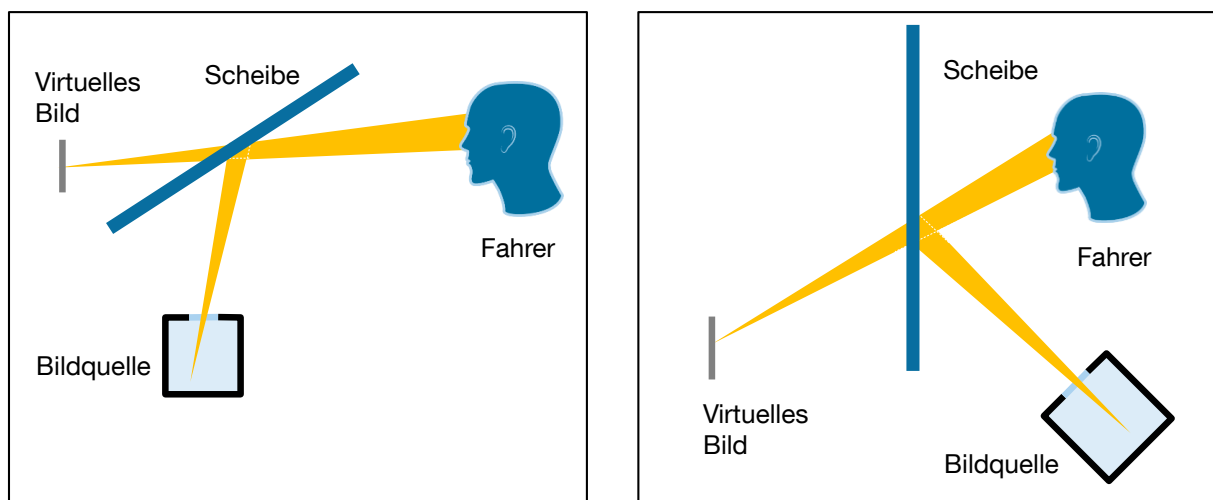


Abbildung 5-1: Geneigte und senkrechte Scheibe bei einem Head-up Display

Ein weiterer Nachteil für den Einsatz im Gabelstapler ist die kleine Eyebox des Anzeigesystems Head-up Display. Die Eyebox umfasst einen Bereich, in dem sich die Augen befinden müssen, damit das virtuelle Bild überhaupt sichtbar ist. Dieser erstreckt sich in der Horizontalen über ca. 20 cm und in der Vertikalen je nach System grob zwischen 5 – 25 cm [Sch-2009]. Vor allem die Beschränkung in der Horizontalen ist ein Ausschlusskriterium für die Verwendung im Gabelstapler, da der Fahrer einen großen Bewegungsradius benötigt, um eine optimale Sicht auf die Gabel oder die Last zu gewährleisten. Bei Vorgängen mit großvolumiger Last oder beim exakten Absetzen kann es notwendig sein, dass der Gabelstaplerfahrer seinen Oberkörper samt Kopf stark zur Seite neigt. Dabei sollte dennoch die Information sichtbar sein.

5.2.2 Datenbrille

Datenbrillen sind in den letzten Jahren aufgrund voranschreitender Miniaturisierung von Elektronikkomponenten und Displayeinheiten zunehmend Erfolg versprechender für den Einsatz als Arbeitsassistenzsystem geworden. Für die Nutzung im Gabelstapler bieten sie den Vorteil, dass Informationen unabhängig von der aktuellen Kopfausrichtung des Fahrers immer wahrgenommen werden können. Folglich können auch bei Rückwärtsfahrt oder bei Vorgängen in großen Höhen, bei denen der Fahrer durch das Kabinendach schauen muss, Informationen bereitgestellt werden. Dies ist mit keiner anderen Anzeigetechnologie machbar.

Ein Nachteil von Datenbrillen besteht in einer zu starken Ablenkung von der realen Umgebung, die sie verursachen können. Der Benutzer konzentriert sich auf die virtuelle Information. Bei monokularen Datenbrillen kommt ein zusätzlicher Effekt hinzu. Die Bildquelle ist nur für ein Auge sichtbar, so dass es die Umgebung und die Informationseinblendung aufnimmt, das andere Auge aber nur die Umgebung. Dadurch entsteht eine binokulare Rivalität, die das menschliche Sehen behindert [Wei-2006, Gün-2009]. Sowohl die physische als auch die mentale Belastung des Langzeiteinsatzes von Datenbrillen wird derzeit noch untersucht [Ado-2011]. Ablenkungs- und Ermüdungserscheinungen beim Tragen von Datenbrillen sind hinsichtlich des Einsatzes im Gabelstapler kritisch zu sehen, da aus Sicherheitsgründen während der Fahrt oder beim Lasthandling kein Risiko eingegangen werden kann. Für weniger sicherheitskritische Aufgaben kann die Datenbrille durchaus als Unterstützung eingesetzt werden. Beispielsweise können in der Kommissionierung die Kommissionierzeit und die Fehlerrate verringert werden [Gün-2009, Gün-2011, Gün-2014b].

5.2.3 Projection Mapping

Beim Projection Mapping werden mit Hilfe lichtstarker Projektoren virtuelle Informationen direkt auf die reale Umgebung projiziert. Die Oberfläche der Umgebung wird damit zum Display erweitert. Die Technologie wird auch als räumliche Augmented Reality oder im Englischen als Spatial Augmented Reality bezeichnet. Die Technologie bietet den Vorteil, dass die Darstellung unabhängig vom Betrachter ist. Auch mehrere Betrachter können die virtuelle Information aufnehmen. Ein aufwendiges Tracking des Betrachters kann somit entfallen. Es muss lediglich die geometrische Beziehung zwischen dem Projektor und der Umgebung getrackt werden.



Abbildung 5-2: *Projection Mapping* (Quelle: Volkswagen)

Der Einsatz von Projection Mapping im Gabelstapler bedeutet, dass Informationen in die Umgebung vor dem Gabelstapler, also auf Fahrweg, auf Regale oder auf Last projiziert wird. Ein Anwendungsfall wäre denkbar, bei dem ein Lagerplatz oder eine Last markiert wird, und dem Fahrer somit die korrekte Hubhöhe im Sinne der Virtuellen Gabel übermittelt wird. Voraussetzung dafür ist, dass der Projektor verdeckungsfrei auf den Lagerplatz oder die Last ausgerichtet ist und auch der Gabelstaplerfahrer freie Sicht darauf hat. Dies ist gerade im Gabelstapler aufgrund des Hubgerüsts oder der beförderten Last nicht immer sicherzustellen, so dass die Information nicht immer wahrgenommen werden kann. Der Projektor müsste seitlich oder vor dem Hubgerüst installiert werden, was vor allem unter Berücksichtigung des großen Bau- raums der Projektoren schwer zu realisieren ist und die Fahrersicht zusätzlich ein- schränken würde. Zusammengefasst wird beim Projection Mapping die Darstellung der kontextabhängigen Information von der Kabine nach außen verlagert. Gerade bei den beschränkten Sichtverhältnissen im Gabelstapler ist dies als Nachteil zu se- hen.

5.2.4 Emissive Projection Display

Das Emissive Projection Display (EPD) besteht aus zwei Komponenten, einer trans- parenten, fluoreszierenden Folie und einer Lichtquelle, die auf die Folie ausgerichtet ist. Die Lichtquelle sendet Licht einer bestimmten Wellenlänge aus und regt in die Folie eingebrachte fluoreszierende Nanopartikel zum Leuchten an. Die Fluoreszenz- reaktion ist ungerichtet, so dass das leuchtende Bild von jedem Blickwinkel aus sichtbar ist. Als Lichtquellen werden Laser oder starke UV-Quellen verwendet. Glas- scheiben und andere durchsichtige Oberflächen können mit dem EPD zu einem transparenten Display modifiziert werden (Abbildung 5-3). [Sun-2013]



Abbildung 5-3: Emissive Projection Display (Quelle: Sun Innovations)

Vorteilhaft hinsichtlich des Einsatzes der Technologie im Gabelstapler ist die bereits erwähnte Sichtbarkeit aus jedem Blickwinkel. Die Anzeige ist für den Fahrer von einem beliebigen Punkt innerhalb und selbst außerhalb der Kabine sichtbar. Ein weiterer Vorteil ist die Größe des Displays. Die gesamte Frontscheibe kann als Display genutzt werden. Verändert der Fahrer beispielsweise die Hubhöhe, kann die Anzeige der Virtuellen Gabel der realen Gabel entlang der kompletten Höhe der Scheibe folgen, so dass bis zu einer gewissen Hubhöhe die Informationsanzeige im Sichtfeld auf die reale Gabel gewährleistet ist.

Im Vergleich zum HUD nachteilig zu sehen ist die größere Distanz zwischen der dargestellten Information auf der Scheibe und dem Ort des Arbeitsvorganges. Dadurch verlängert sich der Akkommodationsvorgang, weil die Scheibe vom Arbeitsvorgang weiter entfernt ist als das virtuelle Bild des HUD, welches sich hinter der Scheibe befindet. Dadurch verstärkt sich weiterhin der Parallaxeneffekt. Er entsteht dann, wenn die virtuelle Information nicht in der selben Tiefenebene dargestellt wird wie das betrachtete Objekt. Linkes und rechtes Auge nehmen einen unterschiedlichen Hintergrund zur virtuellen Information wahr (Abbildung 5-4). Je näher die virtuelle Information am Betrachter ist, desto stärker äußert sich dieser Effekt. Dies widerspricht vor allem einer kongruenten Informationsdarstellung.

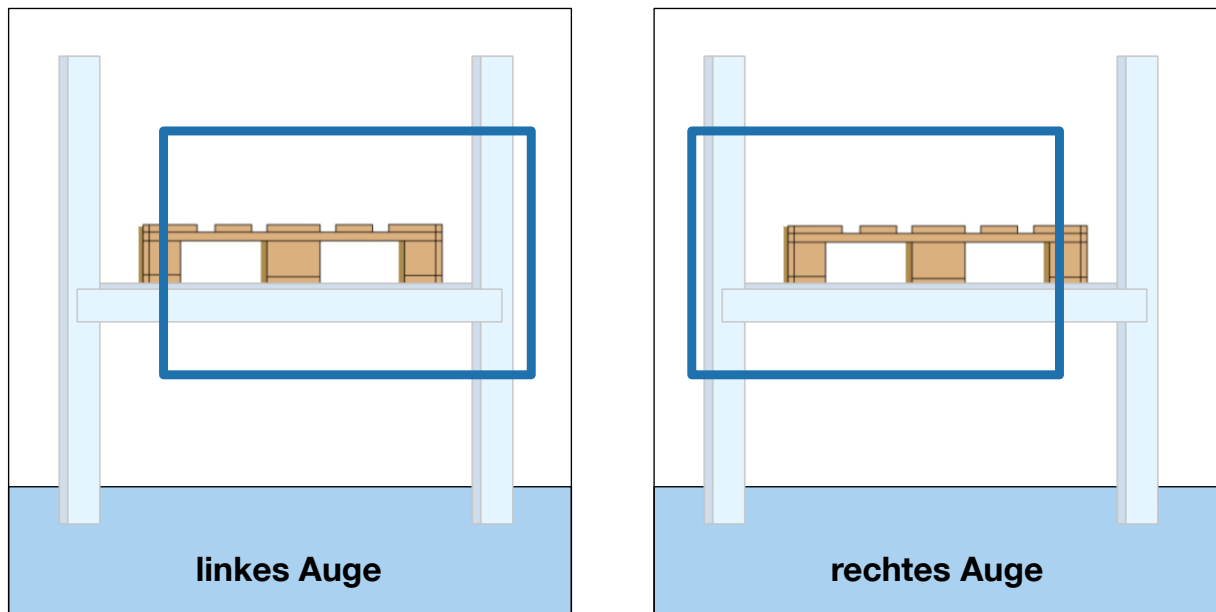


Abbildung 5-4: Parallaxeneffekt - Der blaue Rahmen wird auf der Folie des EPD dargestellt. Für das linke und rechte Auge erscheint der Rahmen an einer anderen Position relativ zum Hintergrund.

Des Weiteren sind bei Verwendung eines Lasers als Lichtquelle Bestimmungen zum Laserschutz einzuhalten.

5.2.5 Auswahl des Visualisierungsmediums

Die Auswahl des Visualisierungsmediums erfolgt nach dem Ausschlussprinzip. Das HUD ist aufgrund der fast senkrechten Scheibe und dem kleinen Bereich, in dem das virtuelle Bild sichtbar ist, im Gabelstapler nicht einsetzbar. Die Technologie Projection Mapping verlagert die Darstellung der Information aus der Kabine hinaus. Dies ist bei den eingeschränkten Sichtverhältnissen im Gabelstapler nicht zielführend. Datenbrillen stellen eine potenzielle Alternative als Visualisierungsmedium im Gabelstapler dar. Aufgrund von Auswirkungen bezüglich der Ablenkung und der Belastung beim Tragen von Datenbrillen ist die Anwendung von Datenbrillen aus sicherheitstechnischen Gründen kritisch zu sehen. Als Darstellungsvariante wird das EPD ausgewählt. Die Möglichkeit, die Frontscheibe zu einem Display zu modifizieren und dem Fahrer eine vom Blickwinkel unabhängige Informationsanzeige zu präsentieren, birgt große Vorteile, die eine verlängerte Akkommodationszeit überwiegen.

5.3 Technisches Gesamtkonzept

Das technische Gesamtkonzept der Virtuellen Gabel ist in Abbildung 5-5 dargestellt.

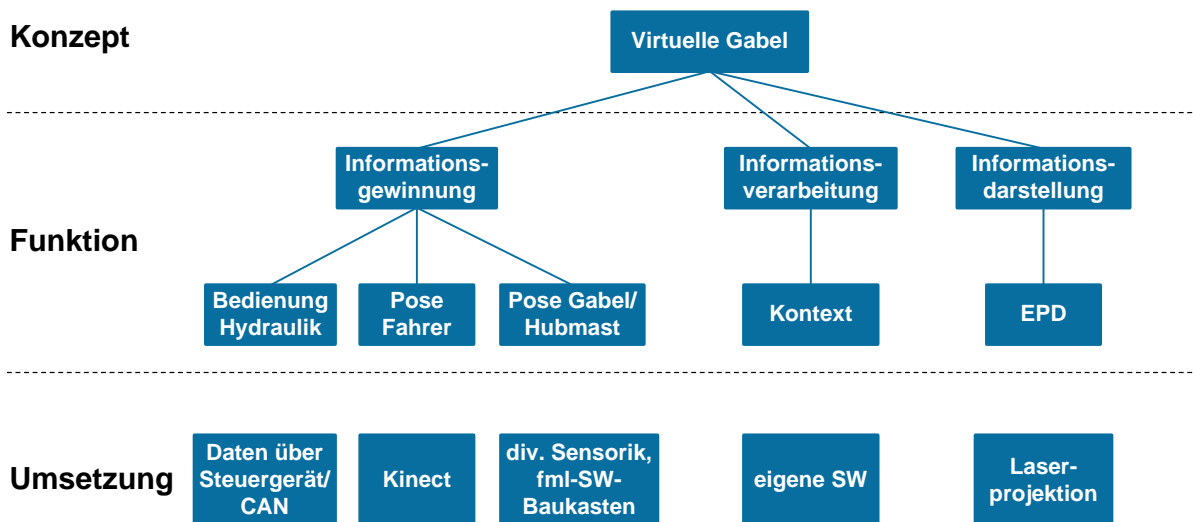


Abbildung 5-5: Technisches Gesamtkonzept der Virtuellen Gabel

Die Funktionen Informationsgewinnung und Informationsdarstellung werden dem Hardware-Konzept, die Funktion Informationsverarbeitung wird dem Software-Konzept zugewiesen. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Unterfunktionen und ihre Umsetzung erläutert.

5.4 Hardware-Konzept

5.4.1 Informationsgewinnung – Bedienung Hydraulik

Um Kenntnis vom jeweiligen Bedienvorgang des Gabelstaplerfahrers zu bekommen, sollen die entsprechenden Signale vom Bordnetz abgegriffen werden. Abhängig davon kann die passende Anzeige der Virtuellen Gabel aktiviert werden. Je nach Modell und Baujahr des Gabelstaplers erfolgt der Signalabgriff digital vom CAN-Bus oder analog von den elektrischen Zuleitungen der Bedienhebel.

5.4.2 Informationsgewinnung – Pose Fahrer

Die Informationsdarstellung soll nahe des Schnittpunkts der Frontscheibe mit dem Sichtstrahl Auge-Gabel positioniert werden. Bewegt der Fahrer seinen Kopf, verschiebt sich auch die Position des Schnittpunktes. Daher soll die Position des Kopfes, wenn möglich samt Orientierung, getrackt werden. Für diese Aufgabe bietet sich die Microsoft Kinect an, ein System, das Farbkamera und Tiefensensor integriert und daher auch als 3D-Kamera bezeichnet wird. In einer spezifischen Variante für das Betriebssystem Windows lässt sich der zu messende Tiefenbereich auf einen Nahmodus einstellen, der zwischen 50–300 cm liegt [Mic-2012]. Dies ist ein geeigneter Bereich, um den Kopf innerhalb der Fahrerkabine zu verfolgen. Im Rahmen

des Forschungsprojekts wird basierend auf dem Kinect for Windows Software Development Kit 1.7 eine Software entwickelt, die den Kopf des Gabelstaplerfahrers trackt. Als Koordinate wird der Mittelpunkt der Augen zurückgegeben, wie in Abbildung 5-6 dargestellt [Ebe-2014]. Die Orientierung wird mit diesem Verfahren nur sehr grob gemessen.



Abbildung 5-6: Tiefenbild der Kinect in einer Gabelstaplerkabine

5.4.3 Informationsgewinnung – Pose Gabel/Hubmast

Die Ermittlung der Posen von Gabel und Hubmast ist der wichtigste Bestandteil bei der Informationsgewinnung im Einsatzszenario Virtuelle Gabel, da diese dem Fahrer übermittelt werden sollen. Wie in Kapitel 4.3.5 beschrieben kann für die Ermittlung der Mastneigung und der Hubhöhe neben Sensorik, die von Gabelstaplerherstellern vereinzelt in Gabelstaplern verbaut wird, auch ein optisches Tracking eingesetzt werden. Vorteil dabei ist, dass die Messungen mit diesem System unabhängig von der Ausstattung auf jedem Gabelstapler durchführbar sind. In diesem Forschungsvorhaben wird auf ein Kamera-Marker-Tracking zurückgegriffen, welches im IGF-Vorhaben 17244 N *Das Staplerauge* am Lehrstuhl fml entwickelt wurde [Gün-2014a].

Für die Anzeige der Seitenverschiebung und der Eintauchtiefe muss die relative Position der Gabel zum Ladehilfsmittel bzw. zu einem Lagerplatz ermittelt werden. Dies kann nur durch ein Tracking realisiert werden, das direkt die geometrische Beziehung zwischen Gabel und Ladehilfsmittel bzw. dem Lagerplatz berechnet, da zum einen Ladehilfsmittel nicht immer exakt mittig auf einem Lagerplatz stehen. Zum anderen wird kein hochgenaues RTLS zur Positionsbestimmung des Gabelstaplers verwendet, um zumindest die geometrische Beziehung zu einem Lagerplatz bestimmen zu können. Auch hier wird ein Kamera-Marker-Tracking angewendet. Der Sensor, die Kamera, wird am Gabelstapler installiert, damit die Posenbestimmung direkt am Gabelstapler durchgeführt werden kann. Im Gegenzug werden Marker als

Referenzen für das Tracking auf die Ladehilfsmittel und Regale angebracht. Die Bestimmung des Kameraanbringungspunkt unterliegt zwei Bedingungen:

- 1) Das Kamerakoordinatensystem und das Koordinatensystem der Gabelzinken müssen in einer fixen Relation zueinanderstehen. Das bedeutet, dass die Kamera am Gabelträger oder an den Zinken selbst befestigt werden muss, um jede Bewegung der Zinken mitzuverfolgen.
- 2) Im beladenen Zustand muss ebenfalls eine freie Sicht der Kamera auf die Marker am Regal bzw. Ladehilfsmittel gewährleistet sein, damit für den Einlagerungsvorgang die optimale Lagerposition ermittelt und dargestellt werden kann.

Vier Alternativen für den Kameraanbringungspunkt werden diskutiert:

- 1) Gabelzinkenspitze
- 2) Seitliche Anbringung an eine Gabelzinke
- 3) Geschützt innerhalb des Gabelträgers
- 4) Seitlich am Gabelträger

Bei Alternativen 2) und 3) ist die Sicht nach vorne verdeckt, wenn Last geladen ist. Marker können nicht mehr referenziert werden. Alternative 1) umgeht das Problem der Verdeckung dadurch, dass die Kamera vorne an der Zinkenspitze angebracht ist. Hiermit ist aber keine Messung der Eintauchtiefe in ein Ladehilfsmittel möglich. Diese Lösung muss zudem sehr robust konstruiert sein und möglichst wenig Bauraum einnehmen. Eine vielversprechende Umsetzung einer in die Gabelspitze integrierten 3D-Kamera wird in [Ove-2013] beschrieben, ist aber nicht käuflich zu erwerben. Alternative 4) ist die einzige machbare Lösung. Die Kamera ist so weit seitlich am Gabelträger angebracht, dass sie an einer geladenen Last vorbeisehen kann. Sie muss sehr geringe Abmaße vorweisen, da sie nur geringfügig tiefer als der Gabelträger sein darf. Der Bauraum ist nach hinten durch den Seitenschieber und nach vorne durch Last eines benachbarten Lagerplatzes begrenzt (Abbildung 5-7). Für das Forschungsvorhaben wird daher die Kompaktindustriekamera uEye XS des Herstellers ids verwendet [IDS-2014].

Anhand der Kameraposition lassen sich Anforderungen an das Tracking ableiten. Bevor der Gabelstaplerfahrer in ein Ladehilfsmittel hineintaucht, fährt er an den Lagerplatz heran und nimmt die entsprechenden Bedienvorgänge vor, um die Zinken zu positionieren. Dies geschieht in einem Rangier- und Sicherheitsabstand von ca. 10–30 cm vor dem Ladehilfsmittel. Addiert man eine Gabelzinkenlänge von 1,15 m hinzu, ergibt sich gerundet eine Entfernung von 1,5 m zwischen Kamera und Marker.

In diesem Abstand sollte das Tracking mit einer Genauigkeit ≤ 1 cm arbeiten, damit die Gabelzinken sicher in das Ladehilfsmittel eingefahren werden können.

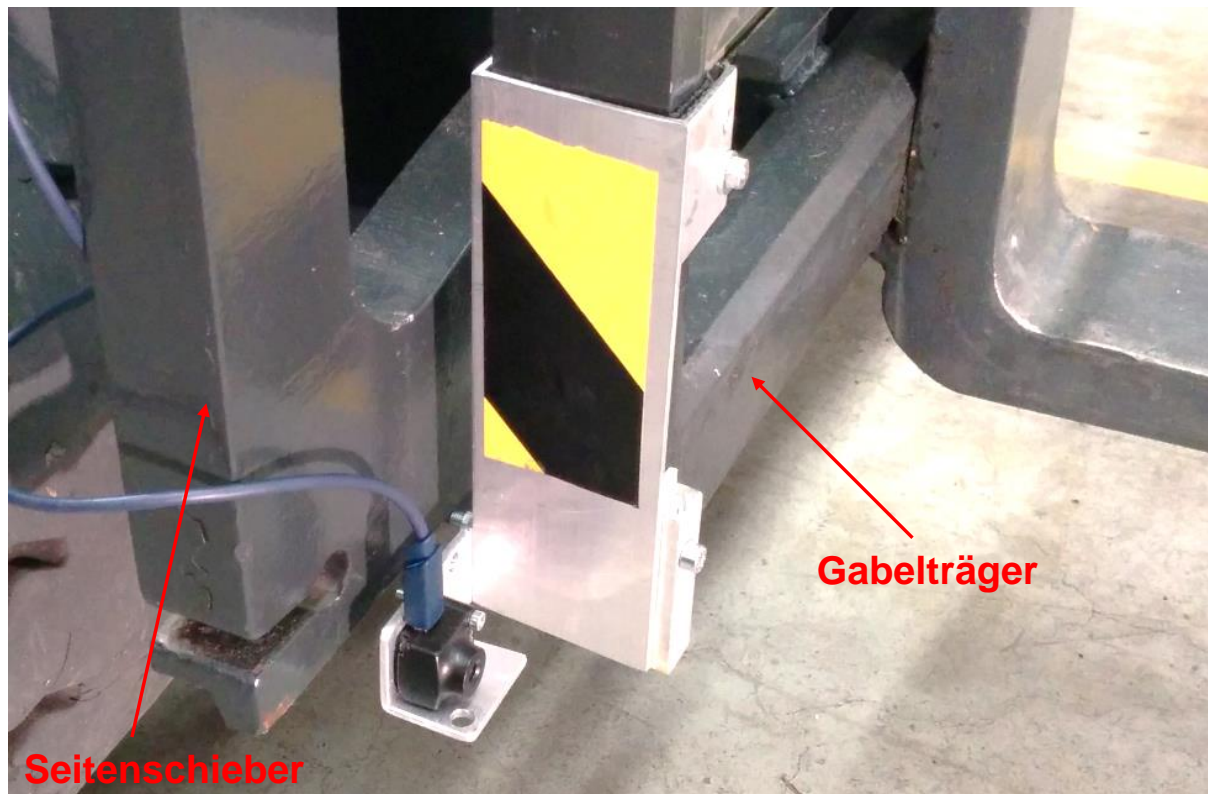


Abbildung 5-7: Kameraanbringungspunkt seitlich am Gabelträger

Für das zweite Kamera-Marker-Tracking wird das Software Development Kit *Metaio SDK 5.3* des Projektpartners *Metaio* verwendet. Diese Trackingsoftware ist weit entwickelt und ermöglicht eine leichte Einbindung der ausgewählten Kamera.

5.4.4 Informationsdarstellung – Emissive Projection Display

Das in Kapitel 5.2.4 vorgestellte EPD kann entweder mit einem Laserprojektor oder einem DLP-Projektor mit einer starken UV-Lichtquelle verwendet werden. DLP-Projektoren verwenden eine Matrix von Mikrosiegeln, um ein Bild pixelweise darzustellen [Tex-2014]. Die Variante mit einem DLP-Projektor funktioniert nur, wenn dieser senkrecht auf die Folie ausgerichtet ist. In der Kabine kann dies nicht realisiert werden, da der Projektor nicht mittig installiert werden kann sondern nur weiter außen an den Säulen oder am Chassis. Ohne eine spezielle Optik ist bei schräger Beleuchtung lediglich ein bestimmter Teil des Bildes fokussiert, der restliche Teil erscheint unscharf. Diese Optik wird von dem Hersteller des Systems, *Sun Innovations*, nicht angeboten [Sun-2014]. Daher wird im vorliegenden Forschungsvorhaben ein System mit Laserprojektor benutzt. Laser sind aufgrund ihrer gebündelten Strah-

lung immer fokussiert. Durch die Zentralprojektion kommt es allerdings zudem zu perspektivischen Verzerrungen, wenn nicht senkrecht auf eine Ebene projiziert wird. Dies muss durch eine entsprechende Vorverzerrung ausgeglichen werden.

5.5 Software-Konzept

Das Software-Konzept beinhaltet die Programmarchitektur und beschreibt den Datenfluss zwischen den einzelnen Software-Modulen, wie Abbildung 5-8 verdeutlicht. Die aufgezeigten Software-Module sind unabhängig voneinander und eigenständige Programme. Sie können auf unterschiedlichen Rechnern oder nur auf einem Rechner ausgeführt werden. Die spezifischen Trackingdaten und Daten zur Ansteuerung des Laserprojektors werden auf Anwendungsebene anhand selbst definierter Protokolle bearbeitet. Die Datenübertragung geschieht über das Transportprotokoll *UDP* und über das Machine-to-Machine (M2M) Nachrichtenprotokoll *MQTT* [MQTT 3.1.1.].

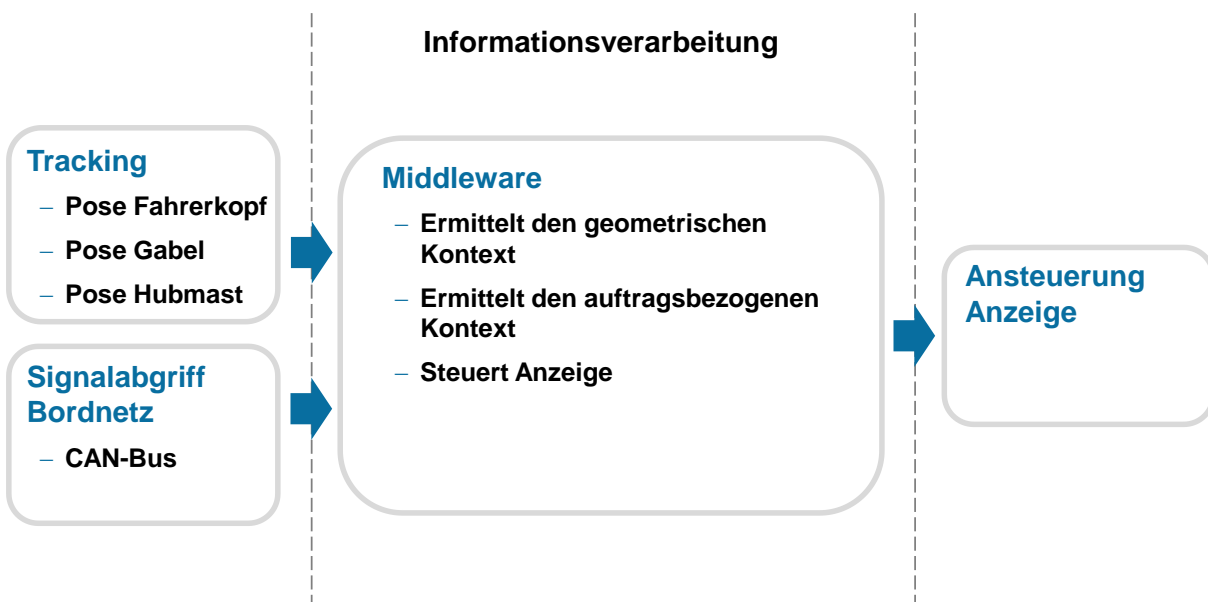


Abbildung 5-8: Informationsfluss im geplanten Software-Konzept

Das Software-Modul *Middleware* übernimmt die Verarbeitung der durch Tracking und Bordnetzabgriff gewonnenen Informationen. Durch einen Abgleich mit internen Daten ermittelt sie den geometrischen und auftragsbezogenen Kontext und bestimmt die anzuzeigende Information, die an die Ansteuerung der Anzeige übergeben wird.

6 Konzeptentwicklung Anzeige

Für die am Lehrstuhl für Ergonomie durchgeführte Entwicklung von Anzeigekonzepten, wurden zunächst grundlegende Untersuchungen eingesetzt, um Aussagen zur Fahrerablenkung bei der gewählten Anzeigetechnologie zu erhalten. Im Folgenden wird auf diese Ergebnisse in Kürze eingegangen und das finale Anzeigekonzept vorgestellt.

6.1 Voruntersuchungen

Da bisher keine Studien zur Untersuchung der Ablenkbarkeit des Menschen sowie der Ablesbarkeit von auf der Windschutzscheibe (WSS) dargestellten Informationen vorhanden sind und bisherige Erkenntnisse zur Ablenkbarkeit des Menschen sowie zur Ablesbarkeit aus Studien zum Head-up-Display (HUD) nicht auf die WSS übertragbar sind, wurde wie folgt vorgegangen. Bezogen auf die Wahl der Informationspräsentation auf der Windschutzscheibe wurden im Rahmen von zwei Basisversuchen am Lehrstuhl für Ergonomie folgende Fragestellungen untersucht, die im Folgenden kurz zusammengefasst dargestellt werden:

1. Überprüfung der Ablenkung des Fahrers durch Informationspräsentation auf der WSS im Vergleich zur Informationsdarstellung im simulierten HUD
2. Überprüfung der Ablesbarkeit von auf der WSS dargestellten Symbolen im Vergleich zur Ablesbarkeit von auf der WSS angezeigten Text bzw. Zahlenreihen

Anzeigen wie HUDs bringen grundsätzlich den Vorteil mit sich, dass eine Blickabwendung von der Straße reduziert wird [Sch-2009]. Allerdings ist diese Anzeige nicht durchwegs einsetzbar und die Größe der Anzeigefläche ist begrenzt und auf eine Position beschränkt. Aufgrund dessen beschäftigt sich der neue Ansatz – Emissive Projection Display (EPD) – mit einer ähnlichen Darstellung von Zusatzinformationen. Der Unterschied liegt darin, dass die Information direkt in der Ebene der Windschutzscheibe eingeblendet wird. Eine Möglichkeit eine derartige Anzeige zu realisieren, wurde von [Sun-2013] bereits vorgestellt. Ein EPD-System besitzt zwei ergänzende Komponenten: Einen Ultraviolett-Laser und eine auf einem Plexiglas beschichtete fluoreszierende Folie (MediaGlass™ der Firma Superimaging™), die durch den auftreffenden Laserstrahl bei entsprechender Wel-

lenlänge zum Leuchten angeregt wird. Ein derart aufgebautes System wurde am Lehrstuhl für Ergonomie genutzt um oben genannte Fragestellungen zu beantworten.

6.1.1 Vergleich Informationspräsentation auf der Windschutzscheibe zu simulierten Head-up-Display hinsichtlich Ablenkung

Im Rahmen einer Probandenstudie im Fahrsimulator wurde am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München in der Semesterarbeit von Stefan Demmelmaier [Dem-2014] untersucht, inwieweit ein solches alternatives Anzeigesystem im Vergleich zu einem herkömmlichen HUD die Aufmerksamkeit des Fahrers im Straßenverkehr beeinflusst und welchen Einfluss dieses System auf die Fahrzeugführung nimmt. Die Studie wurde im statischen Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie durchgeführt. Der Versuchsaufbau besteht aus einer Sitzkiste mit Fahrersitz und Plexiglas-Windschutzscheibe, die mit einer fluoreszierenden Folie beschichtet ist sowie einem Spectrum eLite Laser der Firma KVANT. Um automobile Systeme beurteilen zu können, werden im Allgemeinen – wie auch in dieser Studie – Dual-Task-Methoden verfolgt [Eck-2013]. Unter Verwendung der standardisierten Fahraufgabe „Lane Change Task“ (LCT) für eine dreispurige Autobahnfahrt nach ISO 26022 [ISO 26022] und einer gleichzeitigen visuellen Nebenaufgabe ist eine Aussage bezüglich des Einflusses der Informationspräsentation der zwei Anzeigekonzepte auf den Menschen möglich. Neben der Aufgabe des Fahrspurwechsels in entsprechenden Abständen, bestand die visuelle Aufgabe darin, die Öffnung eines dargestellten Landoltrings zu detektieren und korrekt über eine Tasteneingabe am Lenkrad anzuzeigen. Dadurch war es möglich, die Reaktionszeit zur Bearbeitung dieser Aufgabe objektiv zu erfassen. Der Anzeigeort der visuellen Aufgabe wurde im Versuch je nach Versuchsfahrt variiert. Während in einem Versuchsteil die visuelle Aufgabe in einem simulierten HUD dargestellt wurde, erfolgte in einem weiteren Teil die Darstellung direkt in der Windschutzscheibe als EPD. Insgesamt bestand die Studie aus drei Versuchsteilen, die randomisiert durchgeführt wurden: Eine Baseline-Fahrt (LCT), in der lediglich die Fahraufgabe vom Probanden zu erfüllen war, wurde zwei weiteren Fahrten gegenüber gestellt, die mit der Ausführung der visuellen Aufgabe kombiniert wurden (LCT+HUD, LCT+WSS). Zudem war vor sowie nach der Durchführung dieser drei Fahrten die visuelle Aufgabe sowohl im simulierten HUD als auch im EPD ohne Ausübung der Fahraufgabe zu absolvieren, um einerseits Referenzdaten zur Reaktionszeit ohne Zusatzaufgabe zu erhalten und um andererseits objektiv zu erfassen, ob ein Lerneffekt vorhanden ist.

Für die virtuelle Fahrumgebung der LCT-Strecke wurde die Software „SILAB“ (WIVW GmbH) in der Version 3.0 verwendet. Die Landoltringe im simulierten HUD wurden

direkt in die Ebene der Fahrszenerie implementiert, während bei der Anzeige der visuellen Aufgabe die EPD-Technologie genutzt wurde.

Neben der Erfassung der objektiven Messdaten, wie Fahrverhalten – abgeleitet aus der mittleren Spurbabweichung – sowie der Reaktionsgeschwindigkeit und Trefferquote zur Detektion und Anzeige der korrekten Öffnung der dargestellten Landoltringe, wurden auch subjektive Bewertungen, wie die Gebrauchstauglichkeit anhand des System Usability Scale (SUS) der beiden Systeme erfasst. Des Weiteren wurde die subjektive Beanspruchungshöhe in den einzelnen Simulationsfahrten mit Hilfe des NASA-TLX-Fragebogens festgestellt.

Das Probandenkollektiv setzt sich aus 21 Teilnehmern zusammen, wobei alle Teilnehmer einem ingenieurwissenschaftlichen Bereich entstammen und zum größten Teil männlich (76%) sowie zwischen 26 und 35 Jahre alt sind (76%). Der jüngste Teilnehmer ist 24 Jahre alt, der älteste 70 Jahre alt. Der Mittelwert des Alters beträgt dabei 31,95 Jahre ($SD=\pm 10,85$ Jahre). Mehr als 90% der Teilnehmer haben bereits Erfahrungen mit einem herkömmlichen Head-up-Display gesammelt.

Die während der Versuchsfahrten aufgezeichneten objektiven Daten zur visuellen Nebenaufgabe – Zeitpunkt des Tastendrucks sowie die Wahl der entsprechenden Taste – wurden gemäß der Signalentdeckungstheorie ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Mittelwerte der durchschnittlichen Hit-Reaktionszeiten für die Detektion der Ringöffnung in den Fahrten der Hauptstudie mit visueller Aufgabe bei einem t-Test und einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ sich signifikant unterscheiden ($t[20]=-5,49$; $p=0,001<0,05$). Das Fahrverhalten wird anhand der mittleren Spurbabweichung gemessen. Die in SPSS durchgeführte einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung (ANOVA) für ein 5%-Signifikanzniveau ergibt, dass kein signifikanter Unterschied bezüglich der mittleren Spurbabweichung zwischen den drei oben erwähnten Versuchsfahrten besteht ($F[1,381; 19]=0,95$; $p=0,37>0,05$). Hinsichtlich der Fahrzeugführung wird somit kein signifikanter Unterschied zwischen den drei LCT-Fahrten festgestellt. Die subjektive Belastungshöhe über den Overall Workload Index war bei Verwendung des simulierten HUD signifikant größer als bei Verwendung der EPD-Technologie. Zurückzuführen ist dies möglicherweise darauf, dass die Versuchspersonen bei der Leinwandanzeige mehr Konzentration aufbringen mussten. Die Landoltringpositionen werden einerseits auf einer größeren Fläche (Leinwand) dargestellt und der Proband musste aufmerksam die gesamte Leinwand betrachten. Darüber hinaus ist die Darstellung der aufleuchtenden Ringe auf der Windschutzscheibe kontrastreicher im Vergleich zum simulierten HUD. Genauere Informationen zu dieser Studie werden in [Kno-2015] veröffentlicht.

6.1.2 Informationspräsentation auf der Windschutzscheibe – Vergleich von Symbolik und Ziffern hinsichtlich Ablenkung

Im Rahmen einer weiteren Probandenstudie wurde im selben statischen Fahrsimulator wie unter 6.1.1 beschrieben, die Ablenkung aufgrund angezeigter Windschutzscheiben-Informationen in Symbol- oder Ziffernform in der Studienarbeit von Carmen Mayer untersucht [May-2014]. Ebenso wurde als Fahraufgabe die standardisierte dreispurige Autobahnfahrt nach ISO 26022 [ISO 26022] gewählt.

Nach Begrüßung und kurzer Einführung in die Versuchsthematik erhielt der Proband wiederum eine Laserschutzunterweisung. Der Versuch begann mit einer Vorstudie, in welcher in einer Art Standversuch vom Probanden lediglich eine kognitive Nebenaufgabe zu erfüllen war. Die Aufgabe war wie folgt vorbereitet. Dem Fahrer werden jeweils fünf Symbole, Landolt-Ringe oder dreistellige Zahlenreihen auf der Windschutzscheibe dargestellt, wovon vier in den Ecken der Windschutzscheibe angeordnet sind. Die fünfte Abbildung befindet sich in der Mitte der WSS. Aufgabe ist es, die Abbildung in der Mitte mit den Abbildungen in den Ecken zu vergleichen und über einen Tastendruck das korrekte Vergleichsobjekt zu detektieren. Am Lenkrad waren hierzu vier kompatibel zur Eckenposition abgebrachte Tasten verbaut. Entsprechend dieser Beschreibung wurde der Proband aufgefordert, in einem Durchgang identische Zahlenreihen, in einem Landolt-Ringe und in einem anderen Durchgang Symbole entsprechend zuzuordnen. Die Reihenfolge der drei Durchgänge erfolgte randomisiert. Vor Beginn der Hauptstudie hatte der Proband die Möglichkeit, sich in einer Probefahrt an das Fahren im statischen Fahrsimulator zu gewöhnen. Die Hauptstudie bestand aus vier Durchgängen, die ebenfalls in randomisierter Reihenfolge abgefahren wurden, wodurch ein Lerneffekt verhindert werden soll. Bei einer Fahrt wurden keine Informationen auf die Windschutzscheibe projiziert (LCT) und der Proband hatte nur die reine Fahraufgabe zu erfüllen. Im Anschluss an diese Versuchsfahrt füllte der Proband den Fragebogen NASA-TLX aus, um die subjektive Einschätzung zur Beanspruchung zu ermitteln. In den drei anderen Fahrten fuhr der Proband wiederum den LCT ab. Allerdings wurden dabei zusätzlich zur Fahraufgabe Symbole (LCT+S), Landolt-Ringe (LCT+L) oder Zahlenreihen (LCT+Z) auf die Windschutzscheibe projiziert. Nach diesen drei Fahrten wurden jeweils zwei Fragebögen beantwortet: Der NASA-TLX und der System Usability Scale (SUS) zur Ermittlung der Gebrauchstauglichkeit der unterschiedlichen Anzeigesysteme. Im Anschluss wurde eine Nachstudie durchgeführt, die identisch zu Vorstudie konzipiert war. Insgesamt betrug die Versuchsdauer pro Proband etwa 60 Minuten.

Entsprechend der ersten Voruntersuchung erfolgte die Auswertung der objektiven Daten hinsichtlich der Aufgabenbearbeitungsdauer und des Fahrverhaltens. Als subjektive Werte wurden die Gebrauchstauglichkeit über den SUS-Fragebogen sowie

die Beanspruchungshöhe in den einzelnen Messfahrten über den NASA-TLX-Fragebogen erfasst.

Die nachfolgende Analyse basiert auf einem Kollektiv von 21 Personen, von denen sechs weiblich und 15 männlich sind. Daraus ergibt sich ein arithmetisches Mittel von 31,05 Jahren ($SD=\pm 11,03$). Die Teilnehmer besitzen den Führerschein der Klasse B im Mittel seit 12 Jahren. Elf Teilnehmer (52,38%) benötigen eine Sehhilfe, wovon acht Personen (38,09%) eine Brille nutzen und drei Personen (14,29%) Kontaktlinsen. Eine Person (4,76%) gab eine für den Versuch relevante Augenerkrankung an und eine andere Person (4,76%) eine relevante Fehlsichtigkeit. Zusätzlich geht aus dem Fragebogen hervor, dass 13 Personen (61,90%) bereits an einem Versuch in einem statischen Fahrsimulator teilgenommen haben, acht Personen dagegen führen zum ersten Mal in einem Fahrsimulator. Sechs Personen hatten bereits an dem vorausgegangenen Versuch zur Informationsdarstellung auf der Windschutzscheibe teilgenommen.

Anhand der Studie im Simulator wurde gezeigt, dass Darstellungen auf der Windschutzscheibe die Probanden nicht signifikant von ihrer Fahraufgabe ablenken. Zusätzlich stellte sich heraus, dass sich die Ablenkung von der Fahraufgabe bei der Darstellung von Landolt-Ringen, Symbolen und Zahlenreihen – gemessen an den Abweichungen vom idealen Spurverlauf – nicht signifikant unterscheidet ($F[3; 80]=1,372$; $p=0,257 > 0,05$). Bei der Untersuchung der zweiten Hypothese ergab sich, dass sich die Reaktionszeiten, um die richtigen Tasten zu drücken, bei den drei unterschiedlichen Anzeigearten nicht signifikant unterschiedlich sind ($F[2; 60]=1,088$; $p=0,344 > 0,05$). Die Messung der subjektiven Beanspruchung ergab, dass die Probanden bei den Fahrten mit Informationsanzeige auf der Windschutzscheibe eine deutlich höhere Beanspruchung empfanden, als bei der reinen Baseline-Fahrt. Die subjektive Beanspruchung unterscheidet sich bei den unterschiedlichen Anzeigen jedoch nicht signifikant. Bei dem Test auf Benutzerfreundlichkeit des Systems anhand des System Usability Scale konnte allen drei Anzeigen das Adjektiv „ok“ nach [Ban-2009] zugewiesen werden. Allerdings bleibt hier zu berücksichtigen, dass es sich in diesem Versuch um kein ausgereiftes System handelte, sondern um einen Test, um zu erkennen, auf welche Art der Darstellung die Probanden am besten reagieren können. Den höchsten und somit besten Wert erreichte die Anzeige von einfachen Symbolen (Landolt-Ringe), den schlechtesten Wert die Anzeige von Symbolen.

6.1.3 Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen der beiden Studien kann gefolgert werden, dass die Reaktionszeit zur Detektion der Öffnung der Landoltringe bei der Windschutzscheibenprojektion signifikant höher ist im Vergleich zur Bearbeitung auf einem simulierten HUD. Dies führt entsprechend zur Erkenntnis, dass eine Informationsdarstellung auf der Windschutzscheibe längere Zeit für die Aufnahme und Bearbeitung benötigt als eine Informationsdarstellung im HUD. Begründet werden kann dieser Sachverhalt über die Akkommodationsfähigkeit des Auges. Während sich im simulierten HUD die Landoltringe in der Ebene der Fahrszenarie befinden, muss der Fahrer bei Benutzung der EPD-Technologie zunächst auf die Windschutzscheibe fokussieren, wodurch Zeit beansprucht wird. Zu erwähnen ist zudem, dass das durchschnittliche Alter des Probandenkollektivs relativ gering ist und mit zunehmendem Alter die Fähigkeit hinsichtlich der Nahakkommodation zusätzlich abnimmt [Hah-2012]. Es hat sich aber herausgestellt, dass sich die Anzeigeebene nicht auf die Fahrzeugführung auswirkt. Die durchschnittliche Abweichung von der Idealspur ist während der Fahrt im simulierten HUD sowie mit der Windschutzscheibenprojektion vergleichbar. Die Resultate zum Vergleich der Darstellungsart (Symbolik oder Ziffern/Text) auf der Windschutzscheibe zeigen ebenso, dass diesbezüglich nahezu keine Unterschiede auftreten.

6.2 Ergonomisches Anzeigekonzept

Basierend auf den Untersuchungen aus 6.1 und einer Literaturrecherche wurde am Lehrstuhl für Ergonomie folgende Vorgehensweise zur Erarbeitung eines Anzeigekonzepts angewendet. Im ersten Schritt erfolgte über die Anwendung des digitalen Menschmodells RAMSIS eine Sichtanalyse, um die Positionen zur Darstellung des Anzeigekonzepts auf der WSS zu ermitteln. Hierfür wurde gemäß der ergonomischen Produktentwicklung von einem möglichst breiten Anwenderspektrum ausgegangen. Ziel war es somit, das Konzept für unterschiedliche Fahrergrößen „von der kleinen Frau bis zum großen Mann“ auszulegen. In einem weiteren Schritt wurden im Rahmen einer Literaturrecherche neben technischen auch ergonomische Gesichtspunkte betrachtet, wobei Aspekte wie eine gute Ablesbarkeit, empfohlene Symbolgröße, das Farbkontrastverhältnis sowie die Symbolwahl an sich näher beleuchtet wurden. Die Erkenntnisse hierzu wurden u.a. im Rahmen der am Lehrstuhl für Ergonomie durchgeführten Semesterarbeit von Thomas Graser [Gra-2014] erarbeitet. Mithilfe einer am Lehrstuhl für Ergonomie durchgeführten Expertenevaluation sowie der Durchführung einer Kleinstudie mit realisiertem Anzeigekonzept in einem statischen Demonstrator konnte das entwickelte Anzeigekonzept erstmals evaluiert und für die darauffolgende Evaluationsstudie (siehe Kapitel 8) optimiert werden.

6.2.1 Sichtanalyse mit RAMSIS zur Festlegung der Anzeigeposition

Besondere Relevanz bei der Erstellung des Anzeigekonzeptes kommt der Positionierung der Symbole auf der Frontscheibe zu. Die dargestellten Informationen sollen den Fahrer bei seiner Tätigkeit eine Unterstützung bieten und müssen deswegen schnell erfassbar sein. Gleichzeitig ist eine Sichtbehinderung durch eine Positionierung im Bereich des fovealen Sichtstrahls zu vermeiden. Dazu ist die Kenntnis über die Sichtbereiche eines Gabelstaplerführers erforderlich, womit anschließend die Position für die Anzeige bestimmt werden kann. Für das Lasthandling, die Hinweis- und Warninformationen sind nach ergonomischen Gesichtspunkten jeweils gesonderte Bereiche in Bezug auf die Dringlichkeit festzulegen. Nach [Wic-2004] können folgende Sichtbereiche des Menschen unterschieden werden (siehe Abbildung 6-1):

- **[1] Foveales Sehen:** ~ 2,5° um die zentrale Sehachse
 - Bereich der höchsten Zapfendichte des Menschen
 - Objekte können scharf wahrgenommen werden.
- **[2] Parafoveales Sehfeld:** ~ 15° um die zentrale Sehachse
 - Bereich dient zur dynamischen Orientierung im Raum
 - Farben, ungefähre Formen und Helligkeitsänderungen können wahrgenommen werden.
- **[3] Peripheres Sehfeld:** ~ 50° um die zentrale Sehachse
 - Bewegungen können wahrgenommen werden

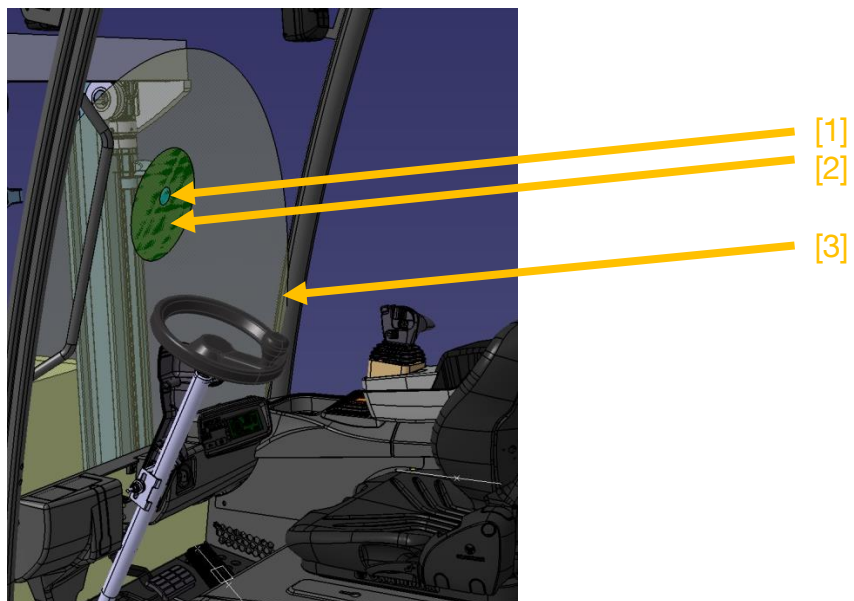


Abbildung 6-1: Sichtbereiche des Menschen: Sichtkegel des Menschen reflektiert auf der Schutzscheibe des Gabelstaplers ([1] foveal; [2] parafoveal; [3] peripher)

Aufgrund unterschiedlicher Körpermaße der Fahrer unterscheiden sich die einzelnen Sichtbereiche auf der Windschutzscheibe. Für eine objektive Analyse der Sichtbereiche für die verschiedenen Anthropometrien wird daher das CAD-Tool RAMSIS in Catia V5 genutzt, in dem die Vielfalt der Menschen virtuell nachgebildet ist.

6.2.1.1 Das CAD-Tool RAMSIS

Das im Rahmen eines Forschungsprojektes u.a. am Lehrstuhl für Ergonomie entwickelte 3D-Menschmodell RAMSIS für CAD-Anwendungen dient grundsätzlich zur ergonomischen Analyse und der Auslegungs-Unterstützung von Produkten und Arbeitsplätzen in der Konstruktionsphase. RAMSIS steht als Abkürzung für Rechnergestütztes Anthropologisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation und wurde in den 1980er Jahren im Auftrag der Forschungsvereinigung Automobiltechnik unter Mitarbeit des Lehrstuhls für Ergonomie zur ergonomischen Gestaltung von Fahrzeuginnenräumen entwickelt. Insbesondere die wissenschaftliche Begleitung zur Bestimmung von ergonomisch günstigen Gelenkwinkeln sowie weiteren Auslegungsmerkmalen erfolgte am Lehrstuhl für Ergonomie [Hum-2012]. Der Funktionsumfang wurde mit dem Modul „RAMSIS *kognitiv*“ um den visuellen Wahrnehmungsprozess erweitert. In [Rem-2009] sind dazu die implementierten Funktionen aufgelistet. Die wichtigsten Aspekte sind nachfolgend zusammengefasst [Rem-2009]:

- Analyse der direkten Sicht: Ermittlung von Sichtverdeckungen durch Körperteile des Manikins oder Fahrzeugbauteile beim Blick auf Anzeigeelemente
- Analyse von Head-up Displays (HUD): Diese Funktion ermöglicht die Berechnung des Bauraumbedarfs für ein HUD und der Strahlengangverläufe durch die Eingabe der Anforderungen an die Anzeige. Sie kann zur Bestimmung der optimalen Größe der sogenannten Eyebox genutzt werden.
- Analyse der Sehschärfe: Auslegung der Schrift- und Symbolgröße einer Anzeige anhand der in DIN ISO 15008 hinterlegten Werte.
- Darstellung erweiterter Sichtfeldgrenzen: Simulation von Grenzen des Blickfeldes bei der auch optische Sehhilfen berücksichtigt werden können.
- Analyse situativer Blickwechselzeiten: Berechnung der Blickwechselzeiten zwischen zwei Objekten.

6.2.1.2 Eingesetzte CAD-Modelle

Zur Analyse der Sichtbereiche diente als Versuchsträger ein CAD-Modell eines Flurförderzeugs der Baureihe EFG 425-430 der Firma Jungheinrich. Wie in der Abbildung 6-2 erkennbar, handelt es sich hier um einen Gabelstapler mit Elektroantrieb.



Abbildung 6-2: CAD-Modell des eingesetzten Gabelstapler

Das CAD-Modell des Flurförderzeugs verfügt über alle zur Analyse relevanten Bauteile und stellt eine exakte Abbildung des zukünftigen Demonstrators dar, in dem das Anzeigekonzept realisiert werden sollen. Der Fahrerarbeitsplatz ist bei Flurförderzeugen nach links verschoben, rechter Hand sind die Bedienelemente angeordnet. Im Allgemeinen wird der H-Point (Hip Point) für Auslegungen herangezogen, um die Hüfte der einzelnen Manikins passgenau im Sitz platzieren zu können. Allerdings lag dieser für die weitere Analyse vom Hersteller nicht vor. Demzufolge wurde auf ein weiteres Maß zurückgegriffen. Laut dem Hersteller Jungheinrich, der das CAD-Modell zur Verfügung gestellt hat, besitzt der SIP (Seat Index Point) folgende Koordinaten, von dem aus der Sitz 135 mm nach vorne und 90 mm nach hinten verschiebbar ist:

$$x = 150 \text{ mm}$$

$$y = 958 \text{ mm}$$

$$z = 915 \text{ mm}$$

Für eine möglichst exakte Analyse der menschlichen Sichtbereiche ist es nötig, nicht nur den Menschen, sondern auch die Lagerumgebung sowie die transportierte Last in die Betrachtung mit einzubeziehen. Daher wurden eine Gitterbox und ein Regal als CAD-Modelle erstellt (Abbildung 6-3). Gemäß den normierten Abmessungen der

Last hat die Gitterbox eine Breite von 835 mm, eine Länge von 1240 mm und eine Höhe von 970 mm [UIC 435-3].

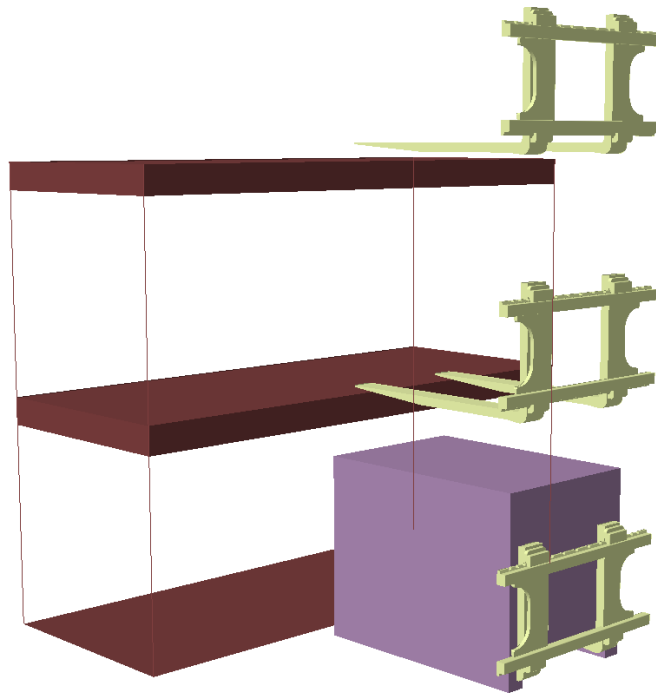


Abbildung 6-3: Darstellung der erstellten Lagerumgebung

Die Höhe einzelner Regalebenen ist im Allgemeinen nicht standardisiert. Um dennoch aussagekräftige Erkenntnisse über die Position der Last und demzufolge über die Sichtbereiche zu erhalten, wird für die Analyse aus der Dicke eines Regalbodens, der Höhe einer einzulagernden Gitterbox und aus einer Zugabe die Fachhöhe für das Lasthandling ermittelt. Beispielhaft ergibt sich bei einer Regalbodendicke von 150 mm, der Lasthöhe von 970 mm und einer Pufferhöhe von 130 mm eine Höhe von 1250 mm für ein Regalfach. Demzufolge befindet sich das unterste Fach 1250 mm über dem Boden und die zweite Regalfachebene auf einer Höhe von 2500 mm.

6.2.1.3 Auswahl und Positionierung der Manikins

Das Anzeigekonzept soll zukünftig für eine Vielzahl an unterschiedlichen Fahrern als Unterstützung zur Verfügung stehen. Da die Möglichkeit der Ermittlung der Kopf- und Augenposition in Echtzeit im Rahmen des Projekts nicht zur Verfügung stehen wird, ist die Position vorab möglichst gut auf alle Anthropometrien abzustimmen. Die Auslegung erfolgt aus diesem Grund mithilfe der vier Extremtypologien der Manikins, wobei zur Sicherstellung von Sichtbarkeit und Ablesbarkeit auf die Körperhöhen von 5. Perzentil (Frau) bis zum 95. Perzentil (Mann) in den Ausführungen von Sitzzwerg und -riese zurückgegriffen wird (siehe Abbildung 6-4). Unter einem Sitzzwerg ist eine Person mit sehr kurzer Sitzhöhe zu verstehen, während bei einem Sitzriesen

diese im Gegensatz dazu sehr lang ist. Die Korpulenz ist bei allen Manikins auf „mitteltick“ eingestellt.

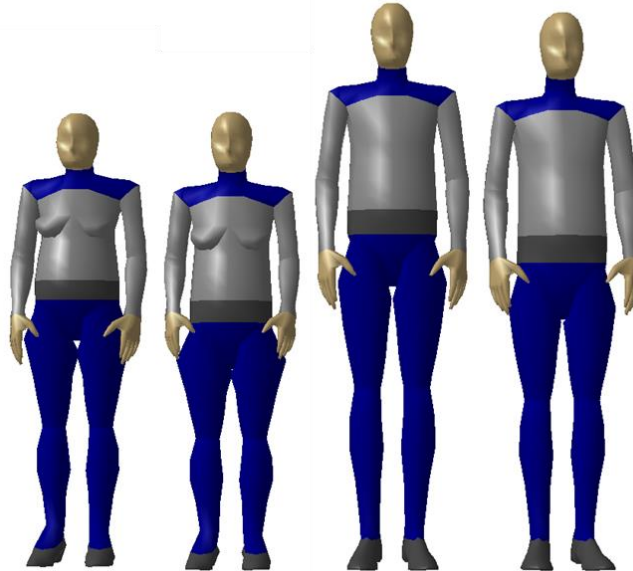


Abbildung 6-4: Extremtypologien der Manikins – von links nach rechts: Sehr kleine Frau (5. Perzentil) als Sitzzwerg und Sitzriese, sehr großer Mann (95. Perzentil) als Sitzzwerg und Sitzriese

Die Analyse der Sichtbereiche erfolgt für alle Altersgruppen von 18 bis 70 Jahren mit den aktuellen Abmessungen als Datenbasis für die Körpermaße. Die Akzeleration in den vergangenen Jahren wird über das verwendete Referenzjahr „2013“ berücksichtigt. Für die Positionierung der einzelnen Manikins wird auf die Definition von Aufgaben zurückgegriffen, wobei Haut- bzw. Körperpunkte der Manikins verschiedenen Zielen zugewiesen werden. Die erforderlichen Geometrien sind in Abbildung 6-5 u.a. orange kenntlich gemacht. Folgende Restriktionen wurden laut [Gra-2014] eingehalten:

- Der Hüftpunkt des Manikins soll auf der Sitzverstelllinie in der Sitzmittelebene liegen.
- Der rechte Fuß steht auf dem Fahrpedal des Gabelstaplers. Die Ferse wird hierfür auf die Bodenplatte gesetzt. Der Fußballen und der Zeh sind auf der Mittellinie der Pedalfläche positioniert.
- Der linke Fuß soll möglichst eben auf der Bodenplatte stehen. Dazu werden die Ferse, der Ballen und die Zehen auf dieser Ebene des Bodenblechs positioniert.
- Beide Unterschenkel müssen sich vor der Ebene der Rückwand des Fußraumes befinden, um eine Überschneidung mit dieser zu verhindern.
- Die linke Hand greift an den Knauf auf dem Lenkrad.



Abbildung 6-5: Positionierung des Manikins anhand definierter Körperpunkte

Basierend auf diesen Restriktionen wird die ergonomisch optimale und komfortabelste Sitzhaltung über ein Haltungmodell automatisch berechnet. Das vorhandene Modell ist für den Fahrer eines Gabelstaplers am Lehrstuhl für Ergonomie entwickelt und optimiert worden. Die Verstellbarkeit des Lenkrades wurde aufgrund des erwartend geringen Einflusses auf die Körperhaltung und damit auf die Sicht außer Acht gelassen.

6.2.1.4 Horizontale Positionierung der Symbole

Grundsätzlich soll die Anzeige den Fahrer unterstützen, ihn jedoch nicht ablenken oder seine Sicht behindern. Insbesondere während des Lasthandlings bei Betätigung der Gabel wechselt der Bediener häufig die Fokussierung, um eine Kollision mit der Umgebung zu vermeiden. Aus diesem Grund ist es einhergehend, dass ein eingeblendetes Symbol während diesem Vorgang nicht im Fokus und somit im fovealen Sichtbereich liegen darf. Eine Verdeckung der Realität mit einem eingeblendeten Symbol ist auszuschließen. Während dem Lasthandling sowie der Fahrt konzentriert sich der Fokusbereich in horizontaler Richtung im Bereich zwischen den beiden Gabeln. Demzufolge wurde für die Analyse der Fokuspunkt des Manikins zunächst auf die linke und anschließend auf die rechte Gabelspitze gelegt. Um die maximalen Auslenkungen sowie die Einflüsse der unterschiedlichen Anthropometrien zu ermitteln, wurde dies für die vier oben beschriebenen Extremtypologien sowie für die unterschiedlichen Aufgabenbedingungen (Regalhöhe; Fahrt mit und ohne Last) durchgeführt.

In Abbildung 6-6 sind die Ergebnisse der Untersuchung zur horizontalen Positionierung des Anzeigeconzepts exemplarisch für das erste Regalfach für alle

Extremanthropometrien dargestellt. Die Kreise kennzeichnen grundsätzlich die Schnittflächen des Sichtkegels auf der Windschutzscheibe. Die links orientierten Kreise ergeben sich aus der Fokussierung der linken Gabelspitze und entsprechend die rechts dargestellten Markierungen. Die orangefarbenen Kreise stellen die foveale Sicht bei Fokussierung der entsprechenden Gabelspitze dar, wobei dies in RAMSIS durch einen Kegel um den Sichtstrahl mit einem Öffnungswinkel von $2,5^\circ$ dargestellt wird [Hum-2011]. Hingegen zeigen die weißen das parafoveale Sichtfeld, wobei sich dieses in RAMSIS durch einen Kegel mit einem Öffnungswinkel von 15° um den Sichtstrahl ergibt [Hum-2011]. Die jeweils obersten Sichtfelder sind dem sehr großen Mann als Sitzriesen zuzuordnen. Darunter folgt der sehr große Mann als Sitzzwerg, die sehr kleine Frau als Sitzriese und am weitesten unten ist das Sichtfeld der sehr kleinen Frau als Sitzzwerg zu sehen. Die Sichtfelder der Frauen sind kleiner, da sie durch die geringere Körperhöhe näher an der Scheibe sitzen und somit der Abstand dadurch geringer ausfällt, wodurch sich der Sichtkegel in kürzer Distanz an der Scheibe schneidet.

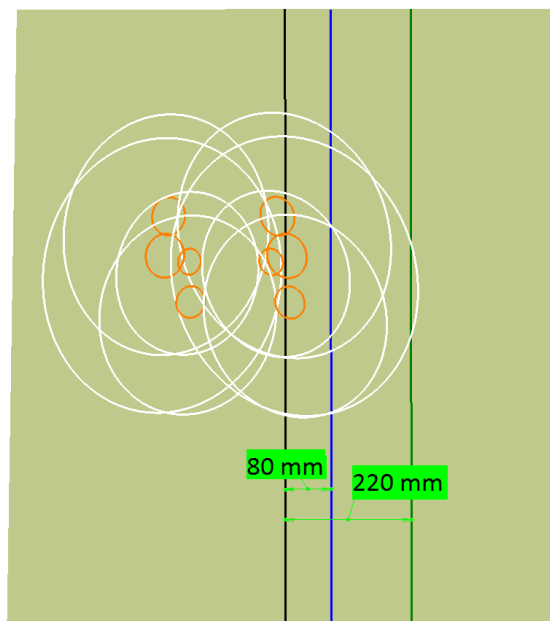


Abbildung 6-6: Horizontale Anzeigeposition: Schnittkreise der Sichtkegel auf der Scheibe für den fovealen Sichtbereich in orange, für den parafovealen Bereich in weiß; links orientierte Kreise bei Fokussierung auf die linke Gabel und entsprechend für die rechts orientierten Kreise; Blaue Linie definiert die linke Abgrenzung für die Anzeige von Lasthandling-Symbolen; Grüne Linie definiert die linke Abgrenzung für die Anzeige von Warn- und Hinweissymbolen

Die schwarze Linie in Abbildung 6-6 stellt die Mittellinie der Frontscheibe dar und dient als Bezugspunkt für die Positionierung. Zwischen den Markierungen für die fovealen Sichtfelder ist eine Anzeige nicht sinnvoll, da sie im Blickfeld des Fahrers liegen würde. Symbole innerhalb der weißen Bereiche sind mit kurzen Augenbewegungen schnell zu erfassen. Aufgrund dessen wird die linke Grenze des

Anzeigefeldes auf den Rand dieses Bereichs gelegt. Sie befindet sich somit in einem Abstand von 80 mm zur Mittellinie und ist durch die blaue Linie dargestellt. Informationen zum Betriebsstatus müssen nicht direkt erfassbar sein und können deshalb auch außerhalb des Optimalsichtbereiches eingeblendet werden. Die linke Grenze (grüne Linie) dieses Anzeigefeldes befindet sich in einer Entfernung von 220 mm zur Scheibenmitte. Die Auslenkung bei den anderen Höhen ist annähernd gleich und wird aus diesem Grund an dieser Stelle nicht weiter erläutert.

6.2.1.5 Vertikale Positionierung der Symbole

Für die vertikale Positionierung der Symbole sind verschiedene Einflussfaktoren, wie Punkt der Fokussierung, Transport von Last, Fokussierung bei Fahrt sowie im Stand zu berücksichtigen. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Fokuspunkt im Folgenden zur Vereinfachung in die Mitte zwischen den beiden Gabelspitzen gelegt wurde, da die horizontale Ausdehnung der Blickfelder bereits in 6.2.1.4 untersucht wurde.

Bei Fokussierung auf Gabel auf Bodenhöhe im Stand

In Abbildung 6-7 ist die Position der Schnittbereiche dargestellt, die sich zwischen den Sichtkegeln in RAMSIS und der Frontscheibe ergeben. Der foveale Sichtbereich ist wiederum in orange gekennzeichnet.

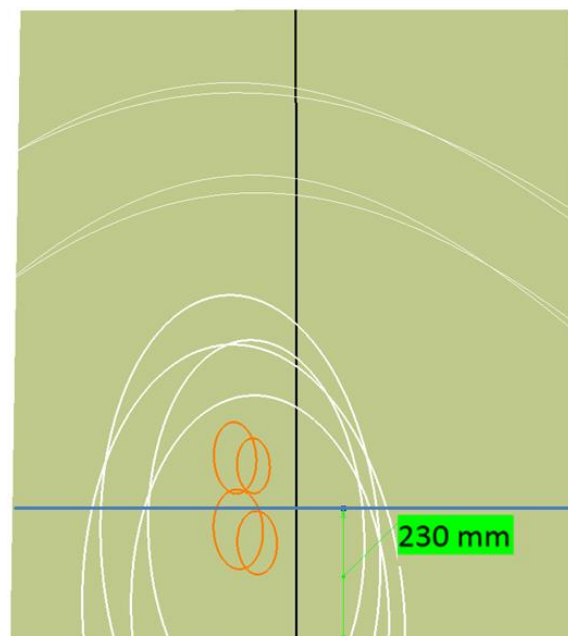


Abbildung 6-7: Vertikale Anzeigehöhe (Unterkante) bei Fokussierung auf den Mittelpunkt zwischen den beiden Gabeln, wobei sich die Gabel auf Bodenhöhe befindet; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien

Die Analyse von 5. Perzentil Frau bis 95. Perzentil Mann ergibt ähnliche Ergebnisse. Aufgrund dessen wird, um die vertikale Höhe der Anzeigeposition festzulegen, der Mittelpunkt des obersten (95. Perzentil Mann) und des untersten Kreises (5. Perzentil Frau) genommen und dann die Anzeige auf einen äquidistanten Punkt gelegt. Demzufolge sollte dieser von allen Gabelstaplerfahrern entsprechend gut zu sehen sein. Gerundet ergibt sich damit für die Unterkante der vertikalen Positionierung der Symbole bei einer Gabel in Bodenposition eine Entfernung von 230 mm zur Scheibenwurzel.

Bei Fokussierung auf Gabel vor Regalfach 1 im Stand

Nach der Festlegung der Anzeige für die Bodenhöhe, erfolgt nun die Betrachtung von Regalfach 1. Dazu wird die Gitterbox mit der Gabel auf eine Höhe von 1250 mm angehoben. Dies entspricht der Regalfachhöhe des in 6.2.1.2 vorgestellten Regals. Der Fokus der Sichtstrahlen wird wie bereits zuvor auf den Mittelpunkt zwischen den beiden Gabelzinken gelegt.



Abbildung 6-8: Vertikale Anzeigehöhe (Unterkante) bei Fokussierung auf den Mittelpunkt zwischen den beiden Gabeln, wobei sich die Gabel auf Höhe des Regalfach 1 befindet; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien

„Bei der Untersuchung der Sichtfelder mit aufgeladener Gitterbox fällt auf, dass die Manikins, beim Versuch die vom Fahrzeug abgewandte Kante der Last anzuvisieren, durch die virtuelle Gitterbox hindurchblicken. Ein Wechsel des Fokuspunktes erscheint jedoch nicht zielführend, da davon auszugehen ist, dass sich der Fahrer des Gabelstaplers zur Seite neigen würde, um an der Kiste vorbeizusehen. Aus diesem Grund kann die Positionierung des Anzeigebereiches für Regalfach 1 nur

ohne Transportgut sinnvoll durchgeführt werden [Gra-2014].“ Dazu erfolgt wieder eine Fokussierung des Mittelpunkts zwischen den beiden Gabelzinken. Aus dem höchsten (95. Perzentil Mann) und dem niedrigsten (5. Perzentil Frau) Sichtfeld ergibt sich dann die in Abbildung 6-8 dargestellte Position für die vertikale Anzeighöhe bei Fokussierung der Gabel vor der Regelebene 1 von 610 mm über der Scheibenunterkante.

Bei Fokussierung auf Gabel von Regalfach 2 im Stand

Eine analoge Untersuchung wird für die Analyse der Sichtbereiche für das Regalfach 2 durchgeführt. Die Gitterbox wird mit der Last auf eine Höhe von 2500 mm, entsprechend dem erstellten Regal, angehoben. Bei der Analyse ist erkennbar, dass nun alle Manikins unter der Last hindurchsehen können. Aufgrund dessen kann ab dieser Höhe von einer Unterscheidung zwischen mit und ohne Last abgesehen werden.

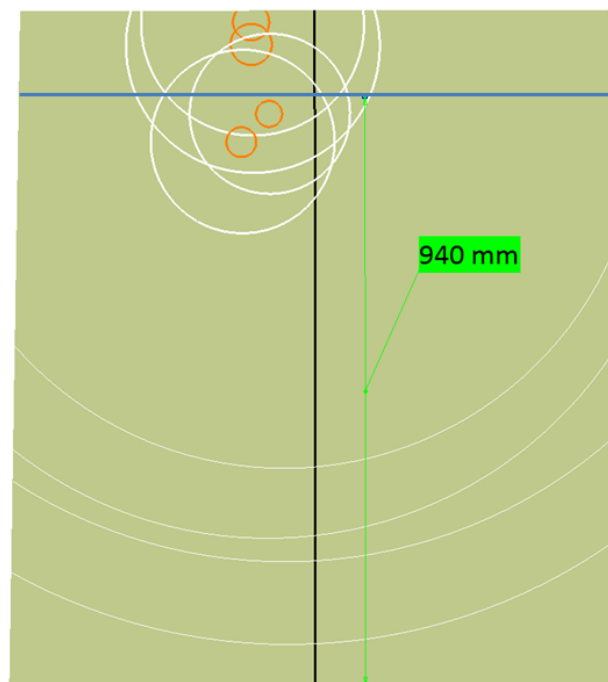


Abbildung 6-9: Vertikale Anzeighöhe bei Fokussierung auf Gabelmittelpunkt vor Regalfach 2; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien

Die oberen beiden Kreise in Abbildung 6-9 stellen das Sichtfeld der sehr großen Männer (95. Perzentil) dar und zeigen, dass bereits bei dieser Gabelhöhe die obere Grenze für die Anzeige auf der Frontscheibe erreicht ist, wenn die Haltung komfortabel gehalten werden soll. Bei einer weiteren Anhebung der Last blicken die Fahrer durch das offene Dach. Die Unterstützungswirkung verringert sich somit wieder, da der Blick auf das Symbol im Bereich der Frontscheibe länger dauert. Die

Höhe für den oberen Anzeigebereich lässt sich auf 940 mm über der Scheibenunterkante festlegen.

6.2.1.6 Ermittlung der Anzeigehöhe für die Statusanzeige

Ebenso wurde eine Sichtanalyse bezüglich der Hinweisanzeigen (Information und Warnung) durchgeführt. Grundsätzlich sollen diese Informationen insbesondere während der Fahrt eine Unterstützung bieten, falls Gefahrenfälle – wie beispielsweise ein Hindernis oder Fußgänger – im Fahrweg vorliegen. Eine Anordnung rechter Hand von den Lasthandlungsanzeigen an einer festen Position erscheint sinnvoll, da diese zusätzlich einblendbar sein sollen. Zusätzlich wurde festgelegt, dass Warnhinweise höher priorisiert sein sollen und demzufolge immer über der Anzeige für Informationshinweise blinkend dargestellt werden sollen. Abbildung 6-10 veranschaulicht die Anordnung der Informations- und Warnhinweise detaillierter.

6.2.1.7 Zusammenfassung der Anzeigebereiche

Zudem sind in Abbildung 6-10 alle Anzeigeflächen gekennzeichnet.

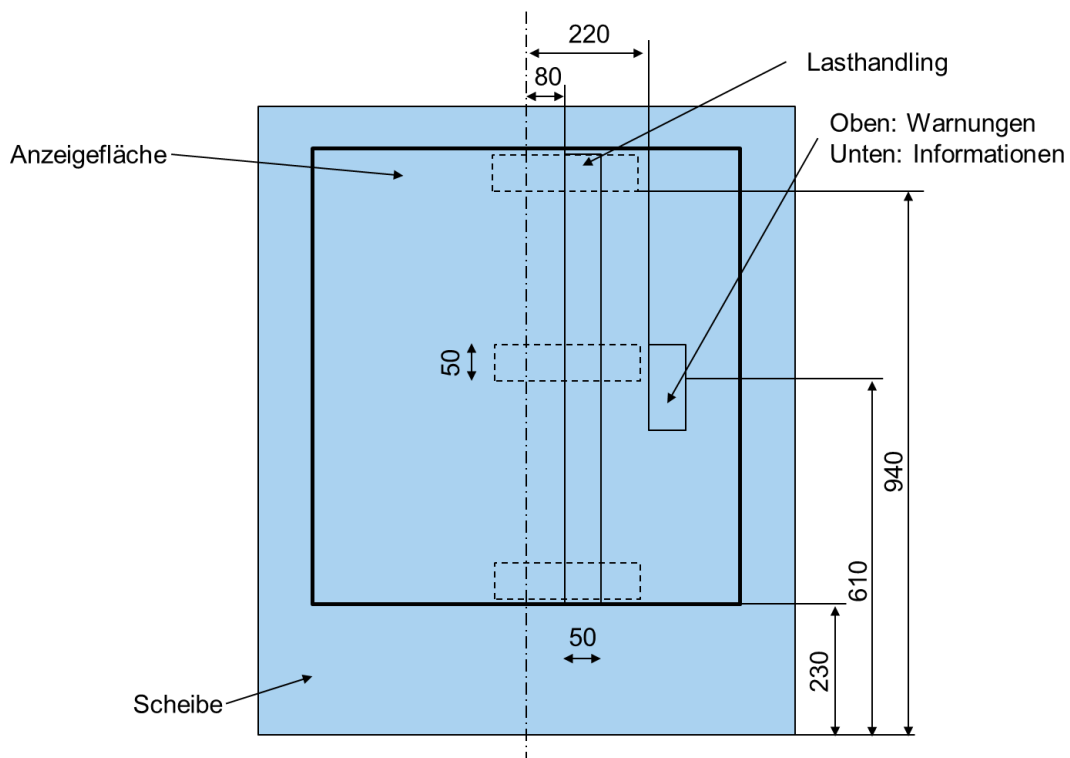


Abbildung 6-10: Darstellung der Anzeigebereiche übertragen auf den Gabelstapler der Baureihe EFG 425-430 der Firma Jungheinrich (nicht maßstabsgetreu)

Die Technologie des Lasers ermöglicht allerdings lediglich eine Anzeige innerhalb des fett markierten Bereichs. Für die Anzeige der Lasthandling-Operationen sei zu-

dem vermerkt, dass die Anzeige entsprechend der Realität angezeigt wird, d.h. wenn die Aufgabe darin besteht, die Gabel von Bodenhöhe auf Regalebene 2 zu erhöhen, bewegt sich die Anzeige dementsprechend entlang der gesamten Anzeige- fläche auf der Scheibe. Die gestrichelten Bereiche bei jeder Regalebene oder auf Bodenhöhe verdeutlichen eine Bewegung in die Tiefe. Die rechts dargestellte Box bietet Platz für bis zu zwei Hinweise, wobei eine Warnung immer höher priorisiert ist als eine Information und somit auch übergeordnet dargestellt wird. Die exakten Positionen sind zudem Tabelle 6-1 zu entnehmen. Die Breite der Anzeigebereiche selbst beträgt entsprechend der empfohlenen Symbolgröße 50 mm. Näheres hierzu wird in 6.2.2.1 behandelt.

Tabelle 6-1: Positionen der Anzeigebereiche

	Vertikale Entfernung zur Scheibenunterkante	Horizontale Entfernung zur Scheibenmitte
Regalboden	230 mm	80 mm
Regalfach 1	610 mm	80 mm
Regalfach 2	940 mm	80 mm
Status	520 mm	220 mm

6.2.2 Gestaltung des Anzeigekonzepts

Für das Anzeigekonzept hat jedoch nicht nur die Positionierung Relevanz, sondern auch die Ausgestaltung der Symbole selbst. In folgenden Abschnitten werden die Größe der Symbolik sowie deren farbliche Gestaltung und Anmerkungen zum Kontrast diskutiert.

6.2.2.1 Symbolgröße

Im Allgemeinen gilt, dass die Größe eines Symbols von seiner Entfernung zum Betrachter abhängig ist. Je weiter dieses entfernt ist, desto größer ist das Zeichen darzustellen. Aufgrund dessen wurde diesbezüglich zunächst der Abstand zwischen dem Fahrer und der Anzeige fläche auf der Frontscheibe im Rahmen der Sichtanalyse ermittelt. Alle dargestellten Zeichen müssen von allen Fahrern in jeder Situation abgelesen werden können. Demzufolge ist die maximale Entfernung zwischen Auge und Frontscheibe ausschlaggebend für die Symbolgröße. Für die Ermittlung des maximalen Abstands wird wiederum das Programm RAMSIS genutzt. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass die Scheibe eines Flurförderzeugs leicht geneigt ist, auf-

grund dessen tritt die größte Entfernung bei am unteren Anzeigenbereich dargestellten Symbolen auf. Deshalb ist den einzelnen Manikins die Fokussierung auf die Gabelspitze in Bodenhöhe als Aufgabe zuzuweisen. Es sei darauf hingewiesen, dass hierbei das 95. Perzentil Mann zugrunde liegt, da dieser am weitesten von der Scheibe entfernt im Flurförderzeug sitzt. Die maximale Entfernung ergibt sich bei dem sehr großen Mann als Sitzriese. Sie beträgt, wie in Abbildung 6-11 dargestellt, ungefähr 965 mm.

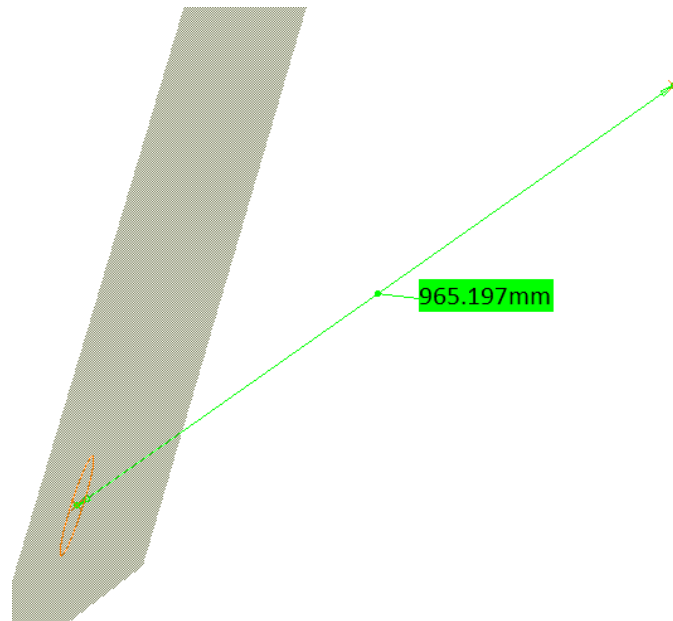


Abbildung 6-11: Maximaler Abstand zwischen Augpunkt des 95. Perzentil Mann Sitzriese und einer Anzeige am unteren Scheibenbereich

Für die Auslegung der Scheibe werden zudem relevante Normen und Hilfsmittel zugrunde gelegt, die im Folgenden näher beschrieben werden.

- DIN EN ISO 15008
- RAMSIS kognitiv
- DIN EN ISO 3864-1
- ASR A1.3

Berechnung der Zeichengröße nach DIN EN ISO 15008: 2011-06

Eine erste Aussage zur Symbolgröße von Anzeigen liefert die Norm „Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug“ [DIN EN ISO 15008]. Die Norm legt Mindestanforderungen an die Gestaltung von sich ändernden Anzeigen in Kraftfahrzeugen fest und soll damit eine gute Lesbarkeit unabhängig von der eingesetzten Technologie gewährleisten. Die Anwendbarkeit der Norm erstreckt sich jedoch unter anderem nicht auf Anzeigesysteme, die „dem externen Sichtfeld überlagerte Informationen enthalten“

[DIN EN ISO 15008]. Da dieser Aspekt im Falle einer Unterstützung im Rahmen des Projekts AR im FFZ vorliegt, kann die Norm somit nur einen Hinweis auf die Mindestgröße liefern und nimmt keinen verpflichtenden Charakter ein. Für alphanumerische Zeichen berechnet sich die Zeichenhöhe nach [DIN EN ISO 15008] wie folgt:

$$x = \alpha_R \times d \quad (I)$$

d : Abstand vom hintersten Punkt der zyklischen Augenellipse zum Schriftzeichen

α_R : Sehwinkel

Der Wert für den Sehwinkel α_R ergibt sich dabei aus Tabelle 6-2 und stellt die Anforderung an die Zeichenhöhe nach [DIN EN ISO 15008] dar. Wird diese für den Referenzbuchstaben H erfüllt, so können alle Zeichen einer Schriftart verwendet werden.

Tabelle 6-2: Zeichenhöhe nach [DIN EN ISO 15008]

Sehwinkel		Eignung
Bogenminuten	Radiant ^a	
≥ 20	≥ 5,815 × 10 ⁻³	Empfehlenswert
≥ 16	≥ 4,652 × 10 ⁻³	Akzeptabel
≥ 12	≥ 3,489 × 10 ⁻³	Minimum ^b

^a Wenn dieser Wert mit dem Betrachtungsabstand multipliziert wird, ergibt sich die aktuelle Zeichenhöhe.

^b In Situationen, in denen die Anforderungen an Genauigkeit und Lesegeschwindigkeit gering sind.

Für das verwendete CAD-Modell des Gabelstaplers wurde der Sehabstand d im vorausgehenden Abschnitt mit 965 mm gemessen. Da die Sehaufgabe anspruchsvoll ist und das Symbol möglichst schnell ablesbar sein sollte, wird für den Sehwinkel α_R der empfohlene Wert herangezogen. Eingesetzt in Gleichung (I) ergibt sich hierfür eine Zeichenhöhe von:

$$x = 5,61 \text{ mm}$$

Ein Symbol in dieser Größe dürfte bei der gewünschten Aufgabe aufgrund einer höheren Komplexität im Vergleich zum Referenzbuchstaben H kaum lesbar sein. Daher kann dieser Wert für die Symbolgröße nicht herangezogen werden.

Ermittlung der Zeichengröße mit RAMSIS *kognitiv*

Wie bereits unter 6.2.1.1 erläutert, verfügt RAMSIS über das Softwaremodul RAMSIS *kognitiv*, das es ebenfalls ermöglicht notwendige Zeichengrößen von Anzei-

gen zu analysieren. Hierzu bietet sich die Möglichkeit, an der zu überprüfenden Stelle einen Buchstaben, eine Zahl, ein kraftfahrzeugspezifisches Symbol oder einen bei Sehtests verwendeten Landoltring einzublenden. Die Größe der Schriftzeichen orientiert sich an der DIN EN ISO 15008 [Hum-2011].

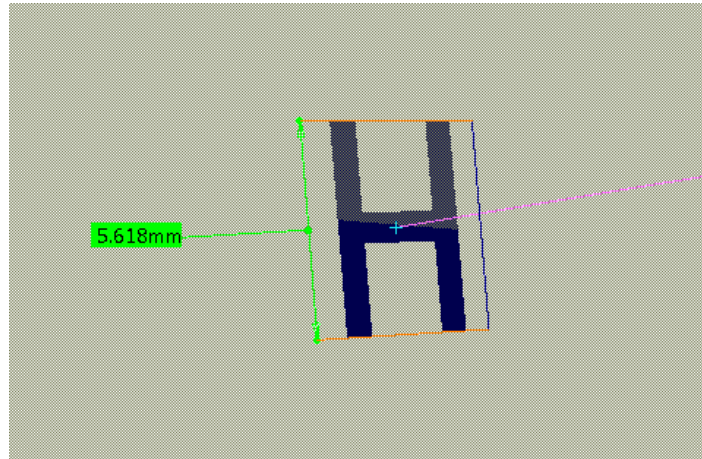


Abbildung 6-12: Zeichenhöhe ermittelt mit Ramsis kognitiv

Die ermittelte Zeichenhöhe für den Buchstaben H beträgt entsprechend der vorherigen Berechnung 5,618 mm (Abbildung 6-12). Da bereits zuvor das Ergebnis bereits verworfen wurde, ist auch nun keine Aussage zur Größe der Symbole möglich.

Berechnung der Zeichengröße nach DIN EN ISO 3864-1:2012-06

Da keine zutreffende Norm für Anzeigen im Sichtbereich gefunden werden konnte, orientiert sich die Auslegung der Symbolgröße anhand vergleichbarer Sehaufgaben. Sicherheitszeichen bieten sich hierbei besonders an. Ziel ist es, diese in Gefahrensituationen leicht zu erkennen und rasch abzulesen. Die Ausgestaltung derer ist in [DIN EN ISO 3864-1] festgelegt. Grundsätzlich dienen die in der Norm dargestellten Anmerkungen zu Zeichen und Markierungen der Anwendung in Arbeitsstätten und öffentlichen Bereichen zur Gefahrenabwehr.

In Anhang A der [DIN EN ISO 3864-1] sind Informationen zum Verhältnis der Größe eines Sicherheitszeichens zur Erkennungsweite publiziert. Die Erkennungsweite l entspricht dem Abstand vom Betrachter zu einem Gefahrensymbol. Die Höhe h eines Sicherheitszeichens ergibt sich aus der Gleichung:

$$h = \frac{l}{z_0} \quad (II)$$

Die Variable z_0 stellt einen Distanzfaktor dar, der es ermöglicht verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen. Erfolgt die Betrachtung des Zeichens nicht aus

senkrechter Position, wie dies in vorliegendem Fall auftritt (siehe Abbildung 6-11), so muss der Distanzfaktor über die Gleichung berechnet werden:

$$z_{\alpha} = z_0 \times \cos \alpha \quad (III)$$

Für den sehr großen Mann als Sitzriesen erfolgt die Berechnung unter einem Winkel von $51,6^{\circ}$. Somit ergibt sich eine Zeichenhöhe von:

$$h = \frac{965 \text{ mm}}{60 \times \cos 51,6^{\circ}} = 25,9 \text{ mm} \quad (IV)$$

Da diese Berechnung allerdings die Durchsichtigkeit der Anzeigefläche nicht berücksichtigt, ist es erforderlich folgende Anpassung vorzunehmen: Vergleichbar mit beleuchteten Sicherheitszeichen wird z_0 mit dem Faktor 0,5 berücksichtigt. Demzufolge lässt sich eine erste, noch zu überprüfende, Empfehlung für die Symbolgröße mit 26 mm bzw. 52 mm aussprechen.

Größe von Sicherheitssymbolen nach Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3

Die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3 konkretisiert die gesetzlichen Anforderungen an die Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung. Hierbei orientiert sich die Symbolgestaltung an bereits eingesetzten Zeichen. Die Arbeitsstättenrichtlinie gibt an, dass der Zusammenhang zwischen Erkennungsweite und Größe der Sicherheitszeichen nach Tabelle 6-3 zu berücksichtigen ist [Bun-2007].

Tabelle 6-3: Vorzugsgrößen für Sicherheitszeichen nach ASR A1.3 [Bun-2007]

Erkennungsweite l [m]	Schriftzeichen Schriftgröße h [mm]	Verbots- und Gebotszeichen Durchmesser d [mm]	Warnzeichen Basis b [mm]	Rettungs-, Brandschutz- und Zusatzzeichen Höhe a [mm]
0,5	2	12,5	25	12,5
1	4	25	50	25
2	8	50	100	50
3	10	100		

Wie zuvor analysiert, beträgt der maximale Abstand zwischen dem Augpunkt des Fahrers und der Anzeigefläche 965 mm, was annähernd einer Erkennungsweite von 1 m entspricht. Demzufolge wird in Tabelle 6-3 folgende Zeile näher betrachtet. Für Verbots- und Gebotszeichen sowie für Rettungs-, Brandschutz- und Zusatzzeichen wird eine Vorzugsgröße von 25 mm angegeben. Die Größe liegt damit in einem

vergleichbaren Bereich wie das Ergebnis aus der Berechnung nach [DIN EN ISO 3864-1]. Ein Warnzeichen soll laut Arbeitsstättenrichtlinie ASR A 1.3 eine Breite von 50 mm haben. Dies entspricht etwa dem Ergebnis aus der Berücksichtigung des Lichtfaktors im vorherigen Abschnitt nach [DIN EN ISO 3864-1].

Festlegung der Symbolgröße

Basierend auf diesen Ergebnissen sowie der Tatsache, dass Schwierigkeiten in der Umsetzung von komplexen Symbolen mit dem Lasersystem bestehen, wird nach ergonomischen Gesichtspunkten folgende Mindestgröße für die Symbolik festgelegt.

Mit der Betrachtung von Gestaltungsmöglichkeiten für Sicherheitssymbole wurde eine vergleichbar anspruchsvolle Sichtaufgabe zur Analyse herangezogen. Unter Berücksichtigung eines Distanzfaktors sowie einer Durchsichtigkeit der Anzeigefläche ergibt sich eine empfohlene Symbolgröße von 52 mm nach [DIN EN ISO 3864-1]. Durch die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3 [Bun-2007] konnte die ermittelte Symbolgröße aus [DIN EN ISO 3864-1] bestätigt werden. Bei dem vorliegenden maximalen Abstand von etwa einem Meter zwischen dem Augpunkt des Fahrers und der Anzeigefläche wird eine Zeichenhöhe von 25 mm bzw. 50 mm empfohlen. Da die Einblendung der Symbole im Randbereich des parafovealen Sichtfeldes erfolgt, fiel die Entscheidung für das Anzeigekonzept auf eine Symbolbreite von 50 mm.

6.2.2.2 Weitere Anforderungen

Die Gestaltung von Symbolen erfordert für eine gute Ablesbarkeit neben der Größe weitere Anforderungen hinsichtlich der Farbgestaltung, der minimaler Strichstärke sowie dem Kontrastverhältnis.

Strichstärke

Die [DIN EN ISO 15008] gibt Werte für das Verhältnis zwischen der Strichbreite und der Zeichenhöhe an. Da eine Verwendung von unterschiedlichen Strichstärken möglich ist, wird folgende Empfehlung angelehnt an o.g. Norm herausgegeben: Das Verhältnis von der Strichbreite zur Höhe des Zeichens soll ein Verhältnis zwischen 0,08 und 0,2 aufweisen und an dem Referenzbuchstaben „H“ gemessen werden [DIN EN ISO 15008]. Nimmt man nun beispielsweise eine Zeichenhöhe von 50 mm an, so hat die Strichstärke zwischen 4 und 10 mm zu liegen. Diese Anforderung bezieht sich allerdings im Wesentlichen auf Schriftzeichen und kann nur begrenzt für die Symbolgestaltung gelten [DIN EN ISO 15008]. Im betrachteten Fall des Projekts ergibt sich die Linienbreite insbesondere aus der eingesetzten Anzeigetechnologie

und deren Leistungsfähigkeit. Die Strichstärke ist daher im betrachteten Fall bereits weitestgehend festgelegt. Weitere Vorgaben werden hier nicht getroffen.

Kontrastverhältnis

Ebenfalls aus der [DIN EN ISO 15008] ergibt sich eine Anforderung an das minimale Kontrastverhältnis der Anzeige. Das Kontrastverhältnis, der Quotienten aus der höheren und der niedrigeren Leuchtdichte, zwischen dem Symbol und dem Hintergrund muss nach o.g. Norm folgende minimale Werte erreichen:

- 5 : 1 für den Nachtzustand
- 3 : 1 für den Zwiellichtzustand
- 3 : 1 für den Tageszustand
- 2 : 1 für den Zustand mit direktem Sonnenlicht

Nach Empfehlung der [DIN EN ISO 15008] soll bei einer Änderung der Leuchtdichte oder der Farbe des Hintergrundes, wie im Einsatzszenario, das minimale Kontrastverhältnis in der Nähe des Symbols auch auf dem schwierigsten Teil des Hintergrundes erreicht werden. Deswegen ist bei einem dynamischen Hintergrund eine zusätzliche Grenzlinie um die Zeichen zu ziehen. Der Kontrast kann dann zwischen der Grenzlinie und dem Umriss des Symbols gemessen werden [DIN EN ISO 15008]. Durch die eingesetzte Anzeigetechnologie mit der Anregung einer Folie durch einen Laser sind diese Parameter nicht direkt beeinflussbar. Das minimale Kontrastverhältnis ist dadurch bereits festgelegt. Die Verwendung einer Grenzlinie zur Erhöhung des Kontrastes, insbesondere vor einem dynamischen Hintergrund, ist durch die Einfarbigkeit des Lasers nicht möglich.

Farbgestaltung

Die Farbe der Symbole hat ebenfalls einen enormen Einfluss auf die Ablesbarkeit. Eine Bewertung verschiedener Kombinationen von Symbol- und Hintergrundfarbe bietet Tabelle 6-4, die der [DIN EN ISO 15008] entnommen ist. Aufgrund der wechselnden Hintergrundfarbe im Anwendungsfall lassen sich diese Empfehlungen nur bedingt für eine Aussage über die Symbolfarbe heranziehen. In gut beleuchteten, hellen Lagern sollte die Anzeigefarbe Blau sein. Eine dunkle Umgebung erfordert hingegen weiße oder gelbe Symbole. Für das Anzeigekonzept ist die Symbolfarbe Blau durch den verwendeten Laser festgelegt.

Tabelle 6-4: Eignung von Symbol- und Hintergrundfarben nach [DIN EN ISO 15008]

Hintergrundfarbe	Symbolfarbe						
	Weiß	Gelb	Orange	Rot ^a , Lila	Grün	Blau ^a	Schwarz
Weiß		–	o	+	+	++	++
Gelb	–		–	o	o	+	++
Orange	o	–		–	–	o	+
Rot ^a , Lila	+	o	–		–	–	+
Grün	+	o	–	–		–	+
Blau ^a	++	+	o	–	–		–
Schwarz	++	++	+	+	+	–	

++ Bevorzugt
 + Empfohlen
 o Akzeptierbar bei großen Unterschieden der Farbsättigung
 – Nicht empfohlen

^a Reines Rot und Blau sollte vermieden werden, da die Augen aufgrund chromatischer Aberration beim Fokussieren auf dies Farben Probleme haben könnten

6.2.3 Evaluation des Anzeigekonzepts mit Expertenbeurteilung und Kleinstudie

Basierend auf diesen Ergebnissen, konnten erstmalig verschiedene Anzeigekonzepte mit dem Laser-Projektionssystem realisiert werden. Mithilfe dieser verschiedenen Anzeigekonzepte erfolgte die Durchführung einer Expertenbeurteilung am Lehrstuhl für Ergonomie, an der 4 Experten mit ingenieurwissenschaftlich-ergonomischen Hintergrund und Expertise im Bereich der Usability teilgenommen haben. Ziel dieser Analyse war es, aus den verschiedenen Anzeigekonzepten das hinsichtlich der Usability am besten geeignete für die weitere Verfolgung im Projekt auszuwählen. An dieser Stelle sei zudem darauf hingewiesen, dass die Symboliken für das Anzeigekonzepte äußerst einfach zu gestalten waren, da aufgrund der Funktionsweise des Lasers nicht unendlich viele Punkte abgefahren werden können (siehe dazu auch Kapitel 5). Mit den Resultaten dieser Expertenbeurteilung wurde im Anschluss eine Kleinstudie in einer statischen Gabelstaplerkabine dazu verwendet, das entwickelte und vorerst ausgewählte Anzeigekonzept auf Verständlichkeit hin zu überprüfen. Hierzu wurde eine subjektive Befragung von 7 Probanden aus dem Bereich Lasthandling im TUM internem Umfeld mit Flurfördermittelschein durchführt. Die Versuchsdauer pro Proband betrug etwa 30 Minuten. Insgesamt wurden 12 statische Symbole und dynamische Animationen im statischen Demonstrator den Probanden dargestellt, die hier nicht weiter erläutert werden sollen. Parallel dazu wurde ein Interview hinsichtlich Verständlichkeit nach vorgegebener Reihenfolge eines vorab vorbereiteten Fragebogens im Dialog mit einem Versuchsleiter geführt. Die Ergebnisse hinsichtlich der Änderungsvorschläge wurden notiert. Im Anschluss erfolgte eine Abwägung der Vorschläge hinsichtlich Sinnhaftigkeit und Machbarkeit, die in das finale Anzeigekonzept (siehe 6.2.4) eingearbeitet wurden.

6.2.4 Umsetzung des Anzeigekonzepts

Im Folgenden soll das final erarbeitete Anzeigekonzept vorgestellt werden, das auf den Ergebnissen der theoretischen Studien sowie auf der Expertenbeurteilung und den Resultaten der Kleinstudie basiert und für die Evaluation (Kapitel 8) eingesetzt wurde. Der Fokus liegt dabei, wie bereits eingangs erwähnt auf der Unterstützung des Lasthandling. Es sei darauf hingewiesen, dass die Abbildungen nicht maßstabsgetreu dargestellt sind. Grundsätzlich wurde bei der Umsetzung darauf geachtet eine Symbolbreite von 50 mm einzuhalten (siehe dazu 6.2.2.1).

Lasthandling Mastneigung

Das Symbol zur Mastneigung bildet die reale Ausrichtung des Mastes auf der Gabel ab. Der Fahrer soll bei der Senkrechtstellung des Mastes unterstützt werden. Dies ist bei der Einlagerung oder Auslagerung von Objekten erforderlich. Entsprechend der Realität wird die Anzeige angepasst. Ein Referenzstrich kennzeichnet die Sollposition, wobei bei Erreichen dieser zusätzlich ein Feedback an den Fahrer über ein Gleichheitszeichen gegeben wird (vgl. Abbildung 6-13, Abbildung 6-14).



Abbildung 6-13: Mast muss zurückgeneigt werden, um in Senkrechtstellung zu gelangen. Entsprechende Anzeige in entgegengesetzter Richtung möglich.



Abbildung 6-14: Bestätigung über senkrechten Mast mit zusätzlichen Gleichheitszeichen (Klammer)

Lasthandling Hubhöhe

Das Symbol zur Einstellung der Hubhöhe bietet dem Fahrer Unterstützung bei der Höhenausrichtung der Gabel (vgl. Abbildung 6-15, Abbildung 6-16). Die Gabel zeigt durch den zusätzlichen Pfeil an, in welche Richtung verfahren werden muss. Referenzstriche linker Hand der Gabel definieren die einzelnen Regalebene, wobei die Zielebene zusätzlich mit dem entsprechenden Buchstaben der Ebene gekennzeichnet ist. Diese Symbolik erstreckt sich gemäß der vertikalen Positionierung über die

gesamte Scheibenhöhe (siehe dazu Kapitel 6.2.1.5). Um Konsistenz zu wahren, wird auch bei dieser Anzeige dem Fahrer eine Rückmeldung über die korrekte Einstellung der Hubhöhe gegeben. Einerseits verschwindet der Pfeil, andererseits erscheint ein entsprechendes Gleichheitszeichen wie beim zuvor beschriebenen Symbol zur Mastneigung.

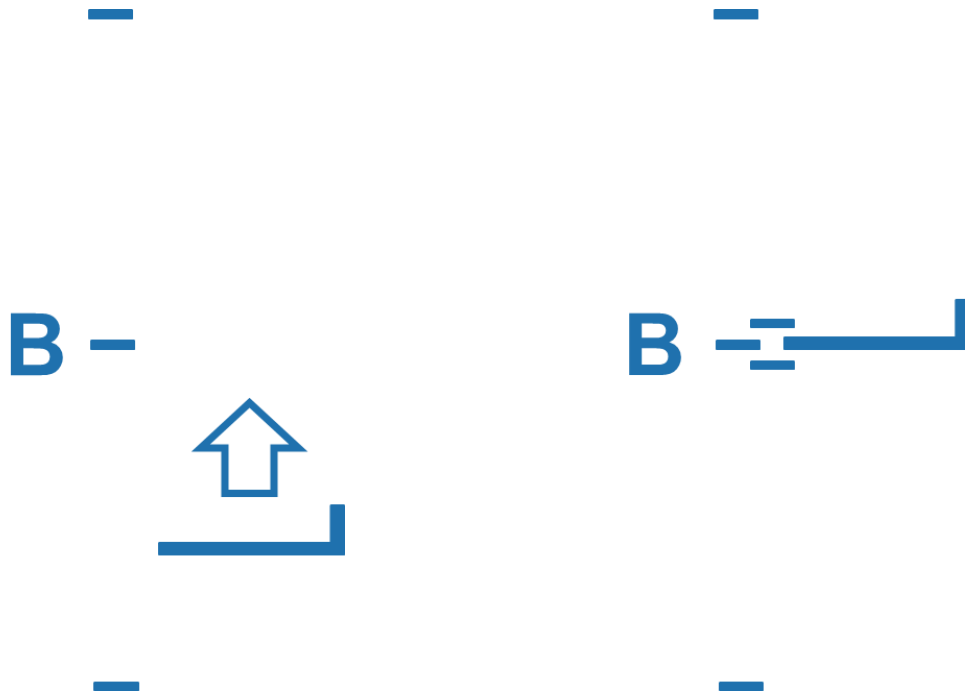


Abbildung 6-15: Gabel muss nach oben in Regal B verschoben werden (Anzeige durch Pfeil nach oben)

Abbildung 6-16: Bestätigung über korrekte Hubhöhe über Anzeige des Gleichheitszeichens (Klammer)

Lasthandling Seitenverschiebung

Die Abbildung 6-17 und Abbildung 6-18 veranschaulichen die Symbolik zur Einstellung der Gabel in horizontaler Richtung. Mithilfe der perspektivischen Ansicht und Einbindung eines Horizonts in das Symbol soll der Verfahrenweg deutlich gemacht werden. Die Referenz bietet in diesem Falle eine perspektivisch abgebildete Palette. Der Pfeil kennzeichnet – wie bereits beim Symbol zur Einstellung der Hubhöhe – die Aufforderung nach links zu verfahren. Erst bei korrekter Einstellung erhält der Fahrer das Feedback, das wiederum über die Gleichheitszeichen realisiert ist.

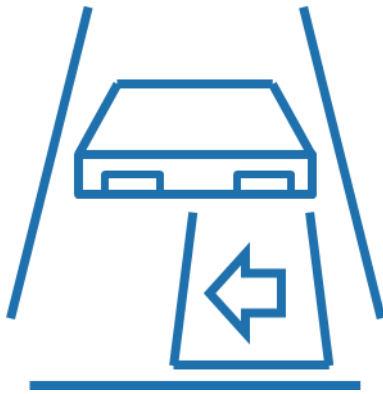


Abbildung 6-17: Gabel muss nach links verschoben werden, um zentrale Position zu erlangen



Abbildung 6-18: Bestätigung über korrekte Seitenverschiebung über Anzeige des Gleichheitszeichens (Klammer)

Lasthandling Eintauchtiefe

Für die Darstellung der Eintauchtiefe wird wiederum die Perspektive geändert. Diese Anzeige soll beispielsweise bei der Ein- bzw. Auslagerung von zerbrechlichen Materialien dienen. Der Pfeil signalisiert wiederum die Handlungsaufforderung, wobei dieser bei korrekter Einstellung ausgeblendet wird (Abbildung 6-19, Abbildung 6-20).



Abbildung 6-19: Es muss in die Palette eingefahren werden. Entsprechende Darstellung ist vorhanden für Ausfahren mit Palette.



Abbildung 6-20: Bestätigung über korrekte Seitenverschiebung durch Entfernung des Pfeiles

Navigation

Die Navigationsanzeige in Kombination mit der Anzeige des anzufahrenden Lagerplatzes kombiniert die Unterstützung beim Zurechtfinden im Lager und die Anzeige der Auftragsdaten, die derzeit noch in einem gesonderten System im Stapler dargestellt werden. Wird ein Pfeil zum Abbiegen eingeblendet, so ist die Intention, dass es

sich dabei um die nächste Abbiegemöglichkeit handelt (Abbildung 6-21, Abbildung 6-22).

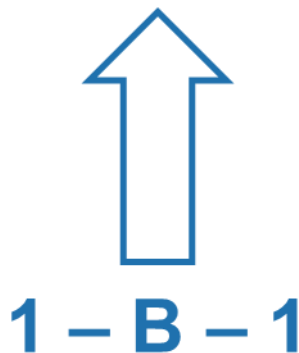


Abbildung 6-21: *Es muss geradeaus zum Lagerplatz 1-B-1 gefahren werden.*



Abbildung 6-22: *Es muss nach links zum Lagerplatz 1-B-1 abgelenkt werden.*

Informations- und Warnhinweise

Wie bereits in Kapitel 6.2.1.5 erläutert, wird zwischen Informations- und Warnhinweisen in der Positionierung auf der Scheibe unterschieden. Zusätzlich soll auch über die Form zwischen diesen beiden Hinweisarten unterschieden werden: Informationshinweise sind grundsätzlich in Kreisform gestaltet (Abbildung 6-23, Abbildung 6-24, Abbildung 6-25), während Warnungen als Warndreiecke wiedergegeben werden (Abbildung 6-26, Abbildung 6-27). Im Rahmen der unter 6.2.3 beschriebenen Kleinstudie mit Staplerfahrern ergab sich, dass eine Anzeige von Kreissymbolen mit einer Verringerung der Geschwindigkeit mit langsamer Weiterfahrt gleichgesetzt wird. Ein Dreieckssymbol wird laut der Befragung mit einem Abbremsen bis zum Stillstand verbunden.

Entsprechend der Informationshinweise wurden standardisierte Verkehrszeichen mithilfe der EPD-Technologie umgesetzt, um Verwirrungen zu vermeiden.

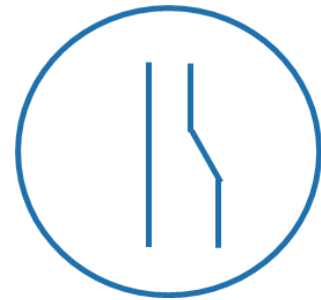
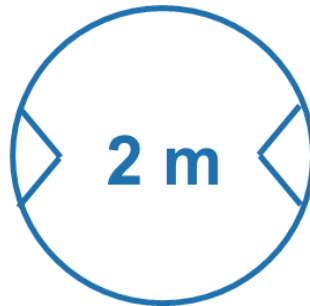
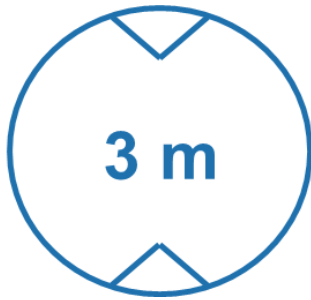


Abbildung 6-23: Durchfahrtshöhe Abbildung 6-24: Durchfahrtsbreite Abbildung 6-25: Spurbreite

Warndreiecke werden innerhalb des Anzeigekonzepts eingesetzt, um den Fahrer auf Gefahren außerhalb des Flurförderzeugs hinzuweisen. Diese Gefahren können einerseits Hindernisse oder Fußgänger sein, die sich außerhalb des Sichtbereichs des Fahrers bewegen (vgl. Abbildung 6-26). Wie bereits zuvor erläutert, wird die Anzeige eines Warnhinweises mit einer Aufforderung zum Stillstand des Fahrzeugs verbunden. Für die höhere Priorisierung wird dieser Hinweis auch blinkend gestaltet. Das Symbol in Abbildung 6-27 stellt ein Problem innerhalb des Fahrzeugs dar und wird neben dem gerade angezeigten Symbol zum Lasthandling oder zur Navigation dargestellt.



Abbildung 6-26: *Hinderniswarnung (3x blinkend bei erstmaliger Anzeige) bei Fußgänger, FFZ* Abbildung 6-27: *Systemwarnung (z.B. bei Betriebsstörung am Stapler)*

Insgesamt wurden für die weitere Verfolgung im Projekt diese Symbole für die Anzeigekonzepte genutzt. Ein Anzeigekonzept war „markerbasiert“, d.h. die Symbole zum Lasthandling wurden der Reihe nach (auch bezeichnet als „mit Reihenfolge“) basierend auf Markerpositionen angezeigt. Folgende Reihenfolge wurde dabei eingehalten, wobei erst nach korrekter Einstellung und positiver Rückmeldung das nächste Symbol angezeigt wurde.

1) Mastneigung

- 2) Hubhöhe
- 3) Seitenverschiebung
- 4) Eintauchtiefe

Im Falle des zweiten Anzeigekonzepts, das „userbasiert“ war, konnte der Nutzer selbst die Reihenfolge der Bearbeitung wählen (auch bezeichnet als „ohne Reihenfolge“).

7 Implementierung des Demonstrators

Dieses Kapitel beschreibt die Implementierung des AR-Systems in dem Gabelstapler. Analog zum technischen Konzept wird auf die drei Komponenten Informationsgewinnung, Informationsverarbeitung und Informationsdarstellung eingegangen. Zusätzlich werden technische Daten des verwendeten Gabelstaplers und sonstige Hardware aufgelistet.

Der Demonstrator wird hinsichtlich einer Evaluation aufgebaut. Bei dieser wird ein Gabelstaplerfahrer Paletten befördern, die in Schwerlastregalen mit Holzfachboden gelagert sind.

7.1 Verwendeter Gabelstapler

Als Demonstrator wird ein 2,5t-Elektro-Gegengewichtsgabelstapler des Herstellers Linde Material Handling verwendet. Gabelstapler dieser Gewichtsklasse weisen relativ große Kabinen auf, so dass sich diese gut für einen Ausbau mit zusätzlichem Equipment eignen. Vorteilhaft bei diesem Gabelstaplermodell ist weiterhin eine serienmäßig ebene Frontscheibe, auf die die Folie des EPD aufgezogen werden kann. Die wichtigsten technischen Daten des Gabelstaplers sind in Tabelle 7-1 zusammengefasst:

Tabelle 7-1: Technische Daten des verwendeten Gabelstaplers

Technische Daten Elektro-Gegengewichtsgabelstapler	
Hersteller	Linde Material Handling
Typ	E25/03/600
Kurzzeichen (VDI 3586)	EFG
Nenn-Tragfähigkeit	2500 kg
Leergewicht	3230 kg
Batteriespannung	80 V
Baujahr	2008
Hubanlage	Simplex-Vollfreisicht-Hubanlage
Hub	3,05 m

Um eine freie Sicht auf die komplette Scheibe zu gewährleisten, ist kein Rückspiegel in der Kabine installiert. Der Demonstrator mit all seinen Komponenten ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

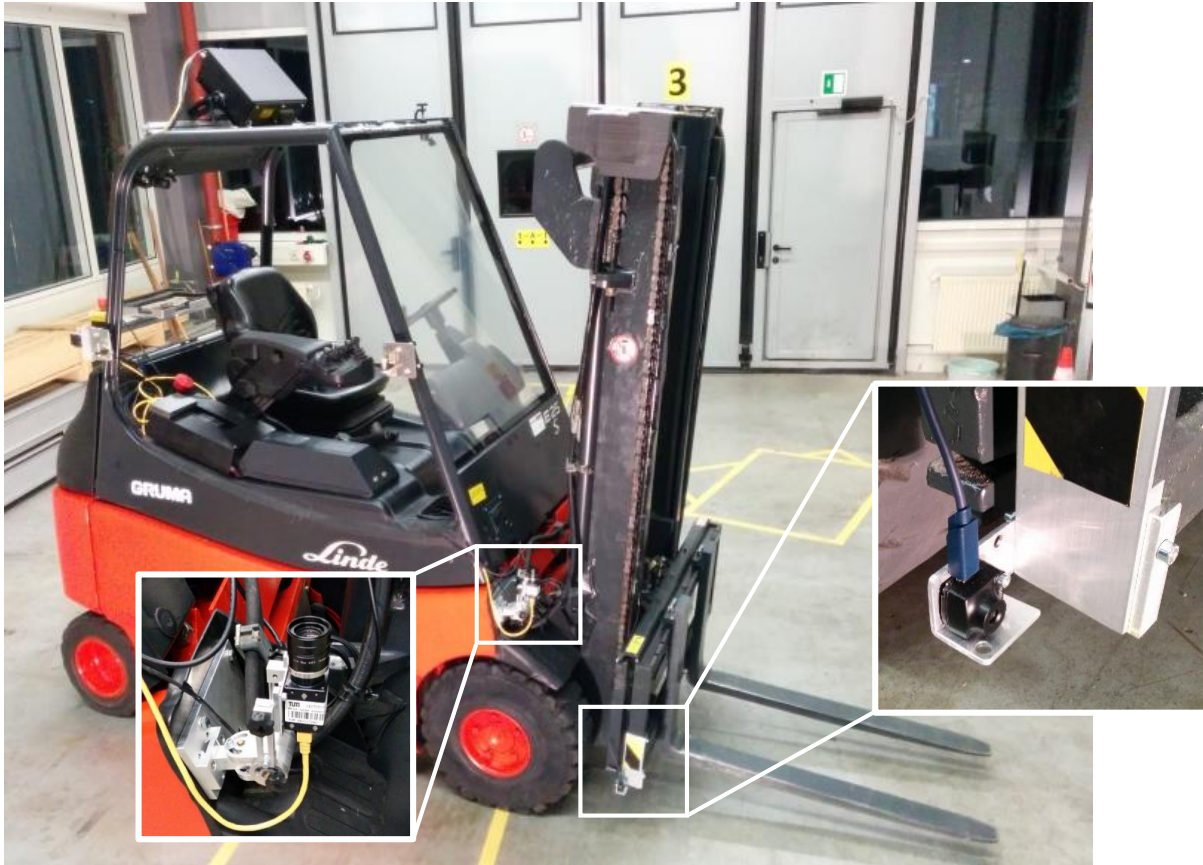


Abbildung 7-1: Demonstrator - Gabelstapler mit integriertem AR-System

7.2 Informationsgewinnung – Tracking

Die in Kapitel 5.4.2 vorgestellte Positionsermittlung des Fahrerkopfes wird im ergonomischen Konzept nicht weiter betrachtet und daher nicht im Demonstrator verwendet. Im Folgenden wird auf das Tracking der Gabel und des Hubmastes eingegangen. Aufgrund der eingesetzten Software wird die Ermittlung der Mastneigung und Hubhöhe *Tracking Staplerauge* und die Ermittlung der relativen Position der Gabel zum Regal bzw. zur Palette *Tracking Metaio* genannt.

7.2.1 Tracking Staplerauge

Hier kann auf die Ergebnisse des Forschungsvorhabens *Das Staplerauge* zurückgegriffen werden [Gün-2014a]. Die Kamera des Trackingsystems wird Abbildung 7-2 am Chassis des Gabelstaplers installiert (Abbildung 7-1 linke Kamera, Abbildung

7-2 links). Die Kamera ist nach oben gerichtet und erfasst einen am Hubmast befestigten 2D-Marker (siehe Abbildung 7-2 rechts). Die Eigenschaften der Industriekamera sind in Tabelle 7-2 beschrieben.

Tabelle 7-2: Technischen Daten der Kamera des Trackingsystems Staplerauge [Gün-2014a]

Technische Daten Kamera Trackingsystem Staplerauge	
Hersteller	Smartek
Typ	GC1392C Kamera-Body
Sensortyp	CCD
Sensorgroße	2/3"
Auflösung	1392 x 1040 Pixel (1,4 Megapixel)
Datenanbindung	Ethernet
Objektiv	Tamron 23FB16

Das System muss einmalig kalibriert werden. Dabei werden die Kamerabildkoordinaten des Markermittelpunkts für verschiedene Hubhöhen und Neigungswinkel aufgenommen. Durch eine polynomiale Interpolation 4. Ordnung können so die Bildpunkte für jede Hubhöhe und Mastneigung berechnet werden. Damit handelt es sich hierbei nicht um einen klassischen Pose-Estimation-Algorithmus, wie er üblicherweise bei Trackingverfahren eingesetzt wird [Gün-2014a].



Abbildung 7-2: Trackingsystem Staplerauge

Die Genauigkeit der Mastneigungsmessung kann nur mit der Genauigkeit der digitalen Wasserwaage, die als Referenzmessung benutzt wird, in Höhe von $0,1^\circ$ beziffert werden. Die Genauigkeit der Hubhöhenmessung variiert ein wenig über die gesamte Hubhöhe, ist aber nie größer als 0,5 cm. Die Angaben zur Hubhöhengenaugigkeit gilt nur für einen senkrecht ausgerichteten Mast.

7.2.2 Tracking Metaio

Für das Tracking der relativen Position der Gabel zum Regal bzw. zur Palette wird, wie in Kapitel 5.4.3 erwähnt, ein System, bestehend aus einer Kompaktindustriekamera und der Tracking-Software des Projektpartners Metaio, verwendet. Die technischen Daten der Kamera sind in Tabelle 7-3 aufgelistet.

Tabelle 7-3: Technische Daten der Kamera des Trackingsystems Metaio

Technische Daten Kamera Trackingsystem Metaio	
Hersteller	IDS Imaging Development Systems GmbH
Typ	uEye XS
Sensortyp	CMOS
Sensorgroße	1/4"
Verwendete Auflösung	1280 x 960 Pixel (1,2 Megapixel)
Öffnungswinkel	Horizontal: $49,6^\circ$ Vertikal: $38,2^\circ$
Datenanbindung	USB 2.0
Objektiv	integriert

Die Anbringung der Kamera erfolgt wie in Abbildung 5-7 dargestellt seitlich in Fahrtrichtung rechts am Gabelträger. Die Kamera ist um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht, damit der größere, horizontale Bildwinkel der Kamera ($49,6^\circ$) in der Vertikalen ausgerichtet ist. Dies ist notwendig, da die Regalmarker in der Vertikalen größere Abstände vorweisen als in der Horizontalen. Zudem wird angenommen, dass der Gabelstaplerfahrer hinreichend mittig an eine Regalspalte heranfährt, so dass die Regalmarker in der Horizontalen immer erfasst werden. Abbildung 7-3 zeigt die Anbringung der Marker am Regal und an einer Palette. Befindet sich der Gabelträger beispielsweise vor dem Stellplatz 2-C-2, so ist die rechts des Gabelträgers angebrachte Kamera mittig vor dem Marker, der rechts von der Beschriftung 2-C-2 angebracht ist. Dies wird in Abbildung 7-4 verdeutlicht, welche ein von der Kompaktindustriekamera erfasstes Bild zeigt.

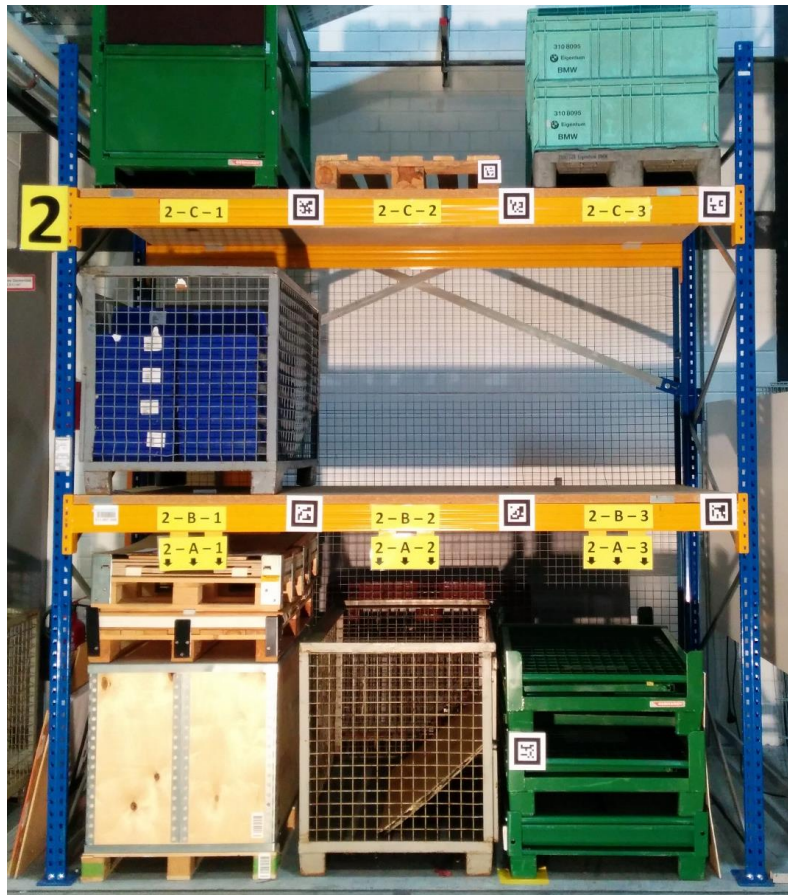


Abbildung 7-3: Regalmarker und Palettenmarker (Palette auf Stellplatz 2-C-2)



Abbildung 7-4: Bild der um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedrehten Kamera

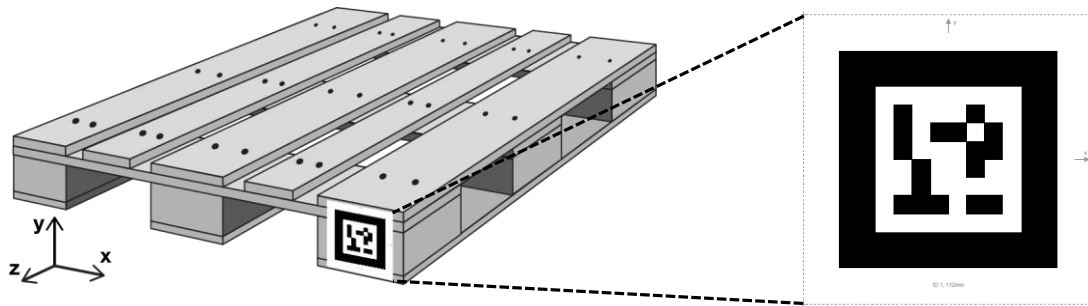


Abbildung 7-5: Palette mit Marker

Abbildung 7-5 zeigt einen Marker, der von der Metaio-Trackingsoftware erkannt wird. Die Regalmarker sind inklusive dem weißen Rand, der für die Markererkennungsalgorithmen zwingend notwendig ist, auf 150 mm bemessen. Dies entspricht der Höhe der Regalquerträger plus Fachboden. Die Durchmesser der Palettenmarker betragen 98 mm, so dass sie auf einem Palettenfuß seitlich jeweils einen Millimeter Spiel haben, damit sie im Extremfall nicht von den Gabelzinken berührt werden können. Somit wird für beide Marker die größtmögliche Abmessung eingesetzt, um eine hohe Genauigkeit zu erzielen. Die Marker werden auf MDF-Platten mit 3 mm Stärke aufgeklebt, um eine glatte Oberfläche sicherzustellen. Dies ist für eine präzise Messung notwendig. Zudem werden die Marker mit einem Tintenstrahldrucker ausgedruckt, da dieser ein tiefes und nicht spiegelndes Schwarz produziert. Mit einem Laserdrucker ausgedruckte Marker sind in Vorversuchen aufgrund Spiegelungen der Deckenbeleuchtung nicht immer erkannt worden.

Ablauf eines Trackingvorganges

Drei Koordinatensysteme werden betrachtet:

- 1) Koordinatensystem Gabelträger
- 2) Koordinatensystem Regal
- 3) Koordinatensystem Palette (jede Palette spannt ein eigenes Koordinatensystem auf)

Die Kameraposition innerhalb des Gabelträgerkoordinatensystems sowie die Markerpositionen innerhalb des Regal- bzw. eines Palettenkoordinatensystems sind durch Offsets festgelegt. Die Achsen des Regal- und Palettenkoordinatensystems sind, wie in Abbildung 7-3 und Abbildung 7-5 dargestellt, ausgerichtet. Diese Ausrichtung basiert auf der Definition der Metaio-Marker. Das Koordinatensystem des Gabelträgers ist dazu in der xy-Ebene gespiegelt. Zu beachten ist, dass das Koordinatensystem des Gabelträgers in Ursprung und Ausrichtung verschieden vom Gabelstaplerkoordinatensystem ist. Letzteres wird für das Tracking nicht benötigt.

Für die Demonstratoranwendung der relativen Position des Gabelträgers zum Regal bzw. zur Palette werden zwei Annahmen vorausgesetzt:

- 1) Die x-Achsen der drei Koordinatensysteme sind parallel. Das bedeutet, dass der Gabelstapler senkrecht vor dem Regal bzw. der Palette steht. Trigonometrische Berechnungen zeigen, dass bei geringen Abweichungen der Messfehler ebenfalls sehr gering ist (Beispiel: 34 mm Messfehler bei 8° Winkelabweichung).
- 2) Die y-Achsen der drei Koordinatensysteme sind parallel. Das bedeutet, dass der Hubmast senkrecht ausgerichtet ist. Auch hier gilt, dass bei geringen Abweichungen der Messfehler gering ist.

Je nach Arbeitsvorgang erfasst die Kamera einen Marker auf dem Regal (Einlagerung) oder auf der Palette (Auslagerung). Der Tracking-Algorithmus berechnet die Pose der Marker relativ zur Kamera. Diese Pose besteht aus drei Translationswerten und drei Rotationswerten, wobei die Rotationswerte aufgrund der Annahmen nicht benötigt werden. Der Vorteil liegt hierbei darin, dass der Tracking-Algorithmus für die Translation präzisere Werte als für die Rotation schätzt. Somit ist die geometrische Beziehung, d. h. die horizontale und vertikale Verschiebung sowie der Abstand zwischen Gabelträger und Regal bzw. Palette, ermittelt.

Die Trackinggenauigkeit der Koordinaten x und y zu ermitteln ist schwierig, da eine Referenzmessung ebenso schwierig durchzuführen ist. Folgendes Verfahren wird angewendet. Ein Tracking wird durchgeführt, wenn die Gabelzinkenspitzen 30 cm von Regal und der Palette entfernt sind. Dann werden die Gabelzinkenspitzen durch eine exakt gerade Vorwärtsbewegung des Gabelstaplers direkt an das Regal oder die Palette herangeführt und mit einem Meterstab nachgemessen. Auf diese Weise kann eine Genauigkeit in der Größenordnung 1 cm nachgewiesen werden. Die Genauigkeit der z-Koordinate kann durch einfaches Messen des Abstands von Gabelträger zu Regal oder Palette überprüft werden. Diese befindet sich ebenfalls in der Größenordnung 1 cm.

7.3 Informationsverarbeitung – Kontext

Der Abgriff der Bordnetzdaten kann in dem Demonstrations-Gabelstapler nicht ohne großen Aufwand realisiert werden, so dass die Information eines aktuell durchgeführten Bedienvorgangs während des Lasthandlings nicht zur Verfügung steht. Das Tracking des Fahrerkopfs wird aus in Kapitel 7.2 genannten Gründen nicht verwen-

det. Somit erhält die Software zur Informationsverarbeitung die Werte des Trackings für Hubmast und Gabel als einzige Eingangsdaten. Der Informationsfluss ist wie in Abbildung 7-6 dargestellt. Bis auf das Modul *Tracking Staplerauge* werden alle Module im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt.

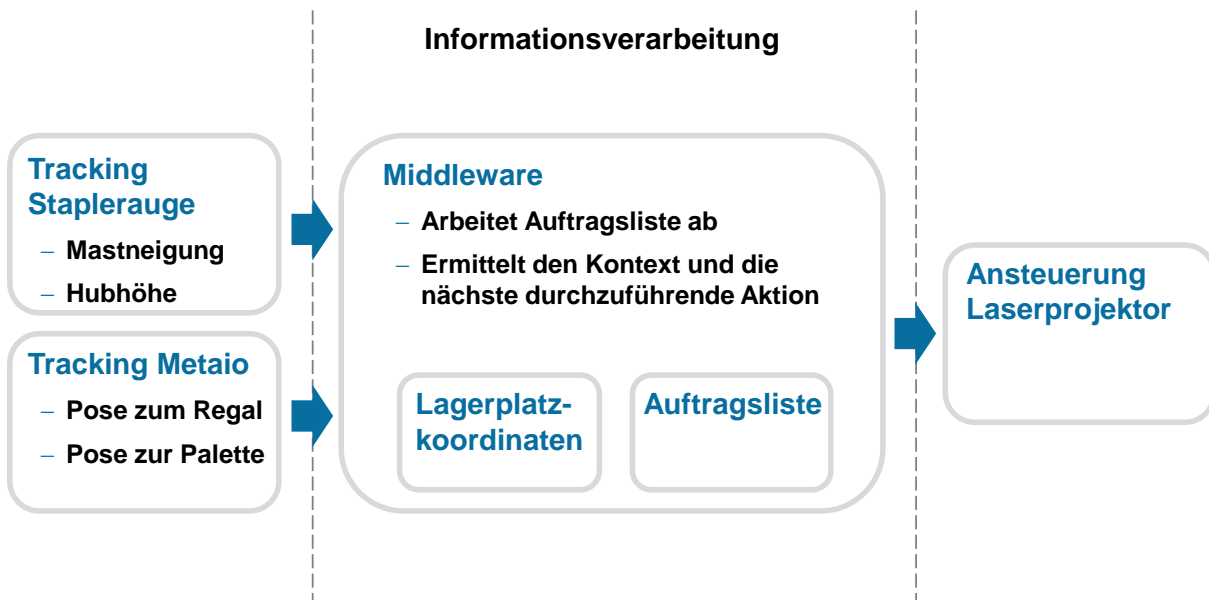


Abbildung 7-6: Informationsfluss zwischen den Software-Modulen

7.3.1 Software-Modul Middleware

Das Software-Modul *Middleware* erhält zum einen Daten über die Mastneigung und die Hubhöhe und zum anderen die Positionsdaten der Gabelzinken relativ zum Regal und zu den Paletten. Dadurch kann sie den geometrischen und auftragsbezogenen Kontext bestimmen. Durch einen Abgleich der relativen Regalposition mit hinterlegten Lagerplatzkoordinaten wird berechnet, vor welchem Lagerplatz sich die Gabelzinken befinden. Ein weiterer Abgleich mit einer ebenfalls hinterlegten Auftragsliste bestimmt, ob der gefundene Lagerplatz in der richtigen Regalspalte ist. Erst dann wird die Anzeige der Virtuellen Gabel aktiviert. Für einen Auslagervorgang werden die Palettentrackingdaten von der *Middleware* verarbeitet, um dem Staplerfahrer Hinweise zum Eintauchen in die Palette zu geben. Für einen Einlagervorgang werden die Regaltrackingdaten verarbeitet, um den Staplerfahrer bei einem möglichst mittigen Absetzen der Palette auf dem Lagerplatz zu unterstützen. Die entsprechenden Anzeigen werden dem Software-Modul *Ansteuerung Laserprojektor* übergeben.

Die Lagerplatzkoordinaten und die Auftragsliste werden für den Aufbau des Demonstrators in der Software hinterlegt, können aber ausblickend über eine Funkchnittstelle von einem Staplerleitsystem eingeholt werden.

7.3.2 Programmablauf Lasthandling

Da das Software-Modul *Middleware* keine Kenntnis des aktuell durchgeführten Bedienvorganges hat, wird eine Reihenfolge vorgegeben, in der das Lasthandling vom Gabelstaplerfahrer durchzuführen ist. Diese Reihenfolge orientiert sich an der allgemein gängigen Praxis [Kau-2011]:

- 1) Einstellung der Mastneigung
- 2) Einstellung der Hubhöhe
- 3) Einstellung der Seitenverschiebung
- 4) Eintauchen in die Palette bzw. Einfahren über den Palettenstellplatz

Dies gilt sowohl für Einlagerungs- als auch für Auslagerungsvorgänge. Eine parallele Ausführung von Bedienvorgängen ist möglich. Die Programmlogik erwartet aber, dass ein Sollwert des jeweiligen Bedienvorganges erreicht wird, bevor zu der nächsten Anzeige weiter geschaltet wird. Verzögerungen aufgrund der nicht-parallelen Bearbeitung werden in der Evaluation berücksichtigt (Kapitel 8.3.1).

7.3.3 Programmablauf Parcour

In der geplanten Evaluation wird ein Parcour abgefahren. Auf den Fahrten zwischen Quelle und Senke einer Last sind zusätzliche Marker platziert, die vom Tracking Metaio erfasst werden. Diese aktivieren eine spezifische, auf den Marker codierte Anzeige wie z. B. Navigationspfeile oder Warnhinweise (Kapitel 8.1).

7.4 Informationsdarstellung – Emissive Projection Display

7.4.1 Folie

Die verwendete Folie kann in zwei Farben leuchten. Je nach der Wellenlänge des Lasers leuchtet sie blau oder rot. Interferenzmuster, Speckle genannt, wie sie z. B. bei Bestrahlung von Laserpointern auf Oberflächen zu sehen sind, entstehen auf der Folie nicht. Auf der Folie sind einige sichtbare Einschlüsse und Kratzer zu erkennen. Die Durchsicht durch die Folie ist leicht milchig und abhängig vom Blickwinkel getrübt. Ein senkrechter Blick bietet die beste Durchsicht durch die Scheibe. Je flacher der Blickwinkel wird, desto trüber wird die Durchsicht. Die technischen Daten sind in Tabelle 7-4 beschrieben.

Die Folie wird bei einem Folierer auf die Original-Frontscheibe des Gabelstaplers aufgeklebt. Dabei wird sie auf die rechte Seite der Frontscheibe aufgezogen, damit die in Abbildung 6-10 dargestellten Anzeigebereiche genutzt werden können.

Tabelle 7-4: Technischen Daten der Folie

Technische Daten Folie	
Hersteller	Sun Innovations
Farben	Rot: 375 nm; Blau: 405 nm
Klarheit	> 95 %
Opazität	< 2%
Absorption des Laser	> 98 %
Breite	29" = 73,7 cm
Länge	Meterware

7.4.2 Projektor

Als Lichtquelle wird ein modifizierter Laserprojektor aus dem Show-Bereich verwendet (Abbildung 7-7), in den der Hersteller einen Laser mit der Wellenlänge $\lambda = 405$ nm und geringer Leistung eingebaut hat. Ein zweiter Laser mit der Wellenlänge $\lambda = 375$ nm wird aus Kosten- und Sicherheitsgründen nicht benutzt, da für Laser mit einer geringeren Wellenlänge als $\lambda = 400$ nm (nicht sichtbarer Bereich) verschärfte Bedingungen gelten.



Abbildung 7-7: verwendeter Laserprojektor (Quelle: Kvant)

Die Ansteuerung ist über einen in das Gehäuse integrierten Controller realisiert, der über Ethernet angesprochen werden kann. Folgend sind die technischen Daten des Projektors gelistet:

Tabelle 7-5: Technische Daten des Laserprojektors

Technische Daten Projektor	
Hersteller	Kvant Laser Systems
Gehäuse	Atom
Wellenlänge Laser	$\lambda = 405 \text{ nm}$
Leistung Laser	4,7 mW
Laserklasse	3R
Öffnungswinkel	60° horizontal und vertikal
Geschwindigkeit	27000 Punkte/s
Controller	Showtacle Moncha.NET
Schnittstelle	Ethernet
Abmessungen	274 x 132 x 255 mm
Gewicht	8 kg

Ein Laserprojektor, auch als Laserscanner bezeichnet, verwendet zwei drehbare Spiegel (Galvanometer), die den Laserstrahl ablenken (Abbildung 7-11). Das Bild wird nicht Pixel für Pixel aufgebaut. Vielmehr fährt der Laserprojektor einen Weg ab und schaltet den Laser ein und aus. Die Galvanometer des verwendeten Laserprojektors können 27000 Punkte in der Sekunde ansteuern. Um ein flackerfreies Bild zu ermöglichen, muss ein Bild mindestens 40 mal in der Sekunde gezeichnet werden. Dementsprechend können insgesamt 675 Punkte für die Anzeige genutzt werden.

In den folgenden Abbildungen 7-8, 7-9 und 7-10 ist die Darstellung mit dem EPD abgebildet.



Abbildung 7-8: Hubhöhenanzeige 1: Durch eine Darstellung der korrekten Regalebene (B) des anzufahrenden Lagerplatzes und eines Pfeils wird der Fahrer beim Einstellen der Hubhöhe unterstützt

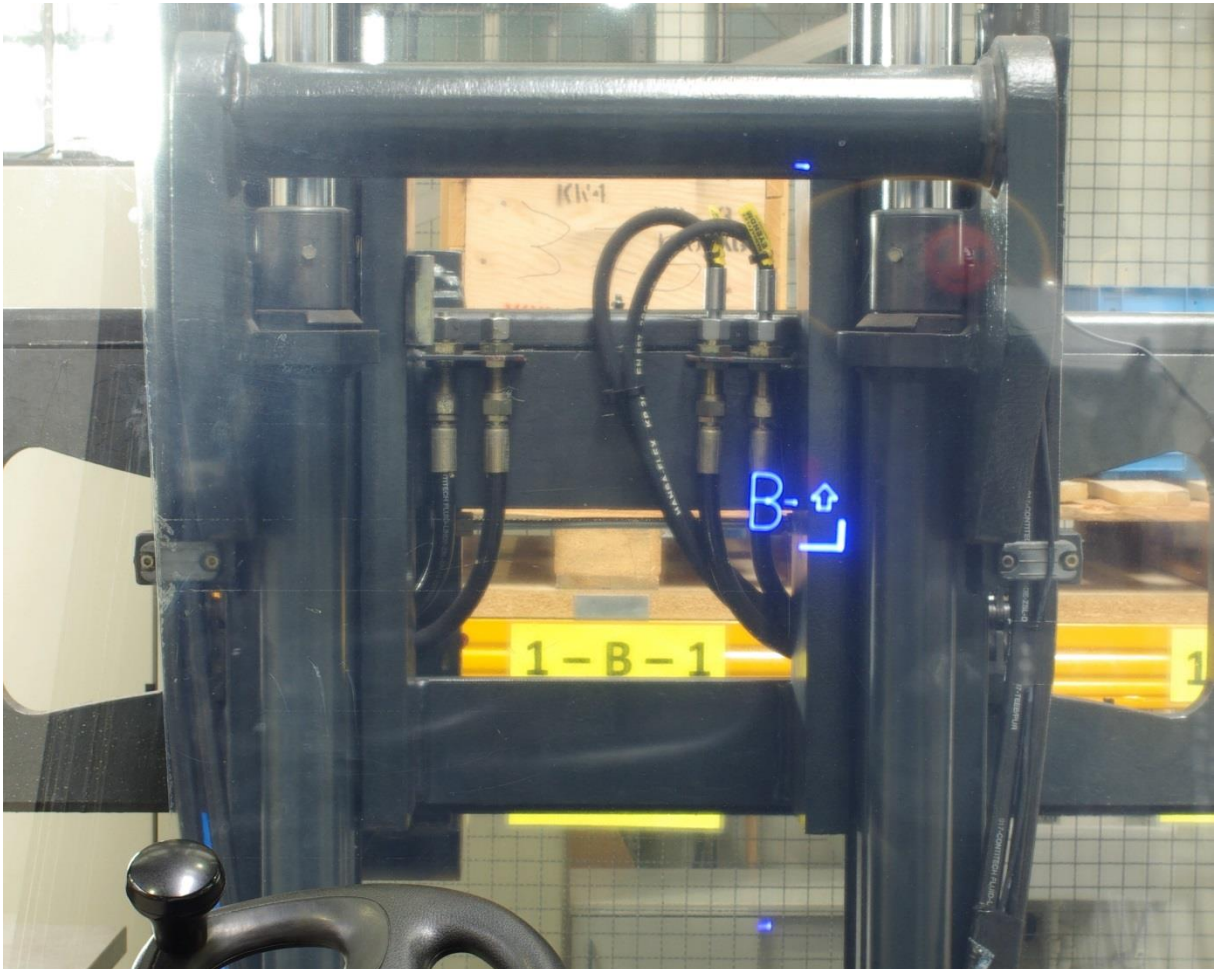


Abbildung 7-9: Hubhöhenanzeige 2: Anzeige aus Fahrersicht



Abbildung 7-10: Navigation zum Lagerplatz 1-B-1

7.4.3 Anbringung des Laserprojektors an der Kabine

Der Laserprojektor ist auf dem Kabinendach installiert und leuchtet zwischen den Dachstreben hindurch. Die Positionierung des Projektors erlaubt eine Ausleuchtung der geforderten Anzeigebereiche. Die rechte Seite der Scheibe kann über die ganze Höhe bestrahlt werden. Die Halterung ist so konstruiert, dass vertikale Vibrationen des Gabelstaplers nicht direkt übertragen werden. Die Vorderkante liegt mit einer Gummierung auf dem Fahrerdach.

7.4.4 Laserschutz

Das System wurde vom TÜV SÜD nach den Prüfgrundlagen der betreffenden DIN-Norm und der Berufsgenossenschaftlichen Vorschrift untersucht und abgenommen [DIN EN 60825, BGV B2]. Hinsichtlich einer Evaluation müssen die Probanden unterwiesen werden und dies schriftlich bestätigen. Reflektierende Gegenstände an Händen und Armen müssen vor dem Hineinsetzen in die Kabine abgenommen werden.

7.4.5 Software zur Ansteuerung des Laserprojektors

Die Ansteuerung des Laserprojektors ist über einen Controller realisiert. Die Software zur Ansteuerung greift auf eine Programmierschnittstelle (API) zurück, die der Hersteller des Controllers zur Verfügung gestellt hat. Bei der Darstellung mit einem Laserprojektor sind technologiebedingte Besonderheiten zu beachten.

Zentralprojektion

Bei einer Zentralprojektion kommt es zu perspektivischen Verzerrungen, wenn nicht senkrecht auf eine Ebene projiziert wird. Dies muss durch eine entsprechende Vorverzerrung ausgeglichen werden. Dazu muss das System kalibriert werden. Dazu wird ein Quadrat auf die Folie projiziert. Das Bild des Quadrates erscheint auf der Scheibe als ein Viereck. Die Koordinaten des Urbildes (Quadrat) werden nun manuell so verändert, dass das Bild auf der Scheibe zum Quadrat wird. Diese Abbildung der ursprünglichen Koordinaten auf die manuell ermittelten neuen Koordinaten wird durch die Transformationsmatrix für eine perspektivische Projektion beschrieben. Deren Berechnung besteht in der Lösung eines quadratischen Gleichungssystems mit acht Unbekannten (4 Punkte \times 2 Koordinaten) und wird rechnergestützt durchgeführt. Alle Punkte, die vom Laserprojektor dargestellt werden sollen, werden mit der Transformationsmatrix multipliziert.

Trägheit der Galvanometer

Um den Laserstrahl abzulenken, werden in Laserprojektoren mit Spiegeln bestückte Galvanometer benutzt (Abbildung 7-11). Diese führen proportional zu einem Steuerstrom eine Drehbewegung aus. Da die Galvanometer eine gewisse Trägheit vorweisen, sind abrupte Richtungswechsel zu vermeiden. Konkret bedeutet das, dass ein anzuzeigendes Objekt keine spitzen Winkel vorweisen sollte. An Eckpunkten kommt es zu einem Überschwingen und die Ecken erscheinen ausgebeult. Abhilfe kann dadurch geschaffen werden, dass an Eckpunkten mehrere Punkte hintereinander angesteuert werden, so dass die Drehbewegungen der Galvanometer verkleinert und somit verlangsamt werden. Bei einer begrenzten Anzahl von 675 Punkten (siehe Kapitel 7.4.2) muss für jede Anzeige ein Kompromiss gefunden werden.

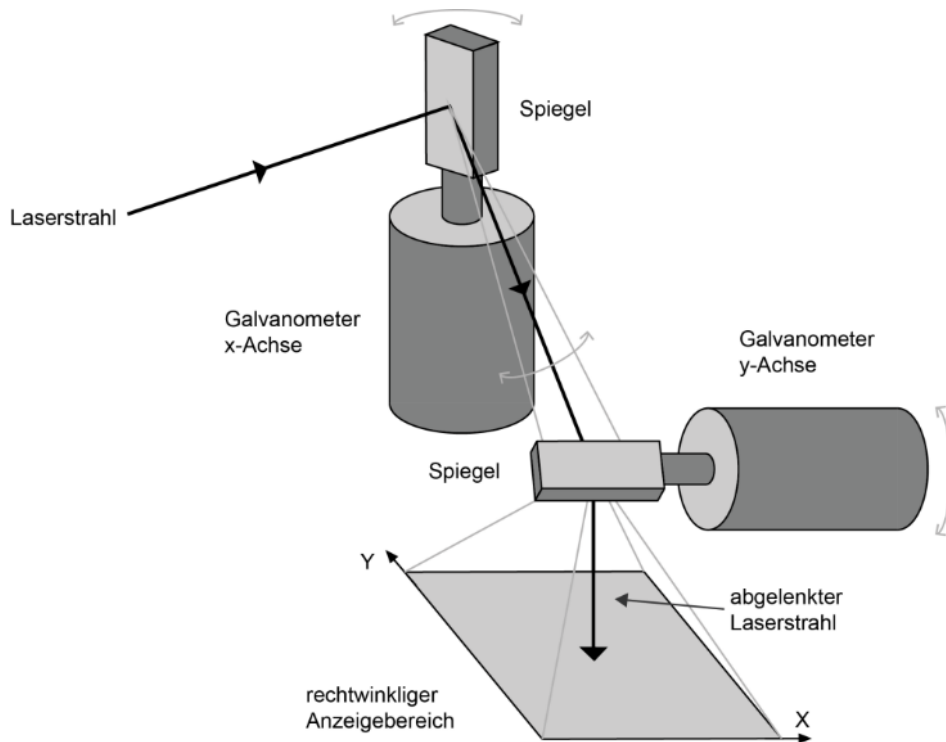


Abbildung 7-11: Funktionsweise der Strahlableitung eines Laserprojektors

Trägheit des Lasers

Sollen mehrere Objekte angezeigt werden, muss der Laser auf dem Weg zwischen den Objekten ausgeschaltet und am nächsten Objekt wieder eingeschaltet werden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Laser eine bestimmte Zeit benötigt, um sich ein- und auszuschalten. Ansonsten erscheinen Verbindungslinien zwischen den einzelnen Objekten.

7.5 Sonstige Hardware

Für den Betrieb der Trackingsysteme und des Laserprojektors wird zusätzliche Hardware in die Kabine integriert.

Rechner

Alle Software-Module werden auf einem einzigen Laptop ausgeführt. Dabei handelt es sich um ein 64-Bit-Windows-7-System mit 8 GB Arbeitsspeicher. Der Prozessor ist ein Dual-Core i5-3660M mit 2,8 GHz-Taktung.

Stromversorgung

Der Laserprojektor und der Laptop benötigen 230 V Wechselstrom zum Betrieb. Hierfür wird eine Stromversorgung bereitgestellt. Mit einem Gleichstromwandler wird die 80 V Bordnetzspannung des Gabelstaplers auf 24 V transformiert. Ein dahinter geschalteter Wechselrichter erzeugt den Wechselstrom.

Netzwerkcommunication

Die Kamera des Tracking Staplerauge und der Laserprojektor sind über Ethernet an den Laptop angebunden. Dazu wird ein Ethernet-Switch als Kopplungselement benötigt.

USB-Verkabelung

Da die USB-Kabelstrecke zur Kompaktindustriekamera über das Hubgerüst 8 m Länge beträgt, wird für eine gute Signalqualität ein USB 2.0-Repeater verwendet, der das Signal aktiv verstärkt.

8 Evaluation

Zur Evaluation des in Kapitel 7 realisierten Demonstrators wurde eine Hauptstudie hinsichtlich Usability, subjektiver Beanspruchung und Aufgabenbearbeitungsdauer in Form eines Parcours durchgeführt. Die Ausarbeitung der Versuchsdesigns sowie die Auswertung erfolgten am Lehrstuhl für Ergonomie. Nach erhaltenen Ergebnissen wurde eine zusätzliche Untersuchung mit Variation der Toleranz zur Rückmeldung durchgeführt. Die Durchführung der Studien erfolgte in gemeinsamer Arbeit der beiden Lehrstühle in der Versuchshalle des fml. Beide Studien sind im Folgenden näher beschrieben. Grundsätzliches Ziel der Studien ist es, folgende Fragestellungen zu klären:

- Welche Auswirkungen hat ein Emissive Projection Display (EPD) im Gabelstapler auf die Dauer der Aufgabenausführung in realer Fahrumgebung?
- Welche Erkenntnisse zur Quantität können hinsichtlich der Genauigkeit bei der Aufgabenausführung bei der Nutzung eines Emissive Projection Display ermittelt werden?

Für beide Versuche (Haupt- und Nachstudie) wurde die identische Versuchsumgebung sowie -fahrzeug genutzt.

8.1 Versuchsumgebung

Die Versuche wurden aus Platz- und Sicherheitsgründen in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml der TUM in Garching durchgeführt. Abbildung 8-1 veranschaulicht die aufgebaute Versuchsstrecke, die folgende Aufgaben beinhaltet:

- Fahraufgabe und Navigation in der Halle
- Handling der Last über Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung und Eintauchtiefe
- Verarbeitung von Informationen (Spurbreite, Durchfahrtsbreite und -höhe)
- Verarbeitung von Warnungen (Hinderniswarnung, Systemwarnung)

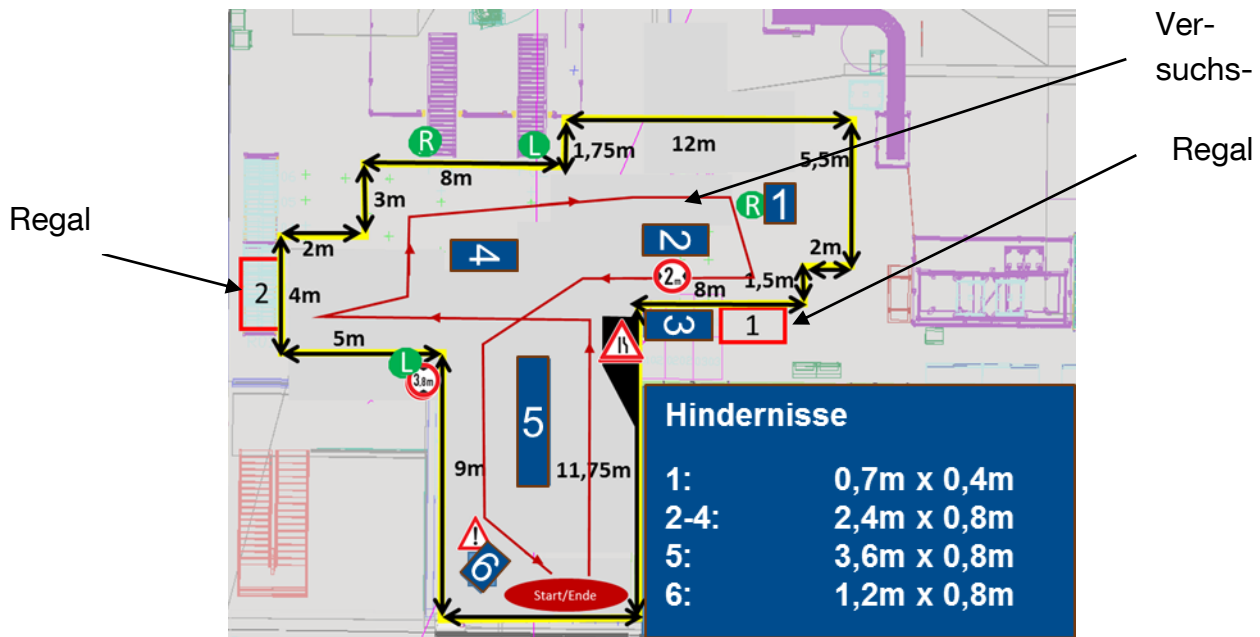


Abbildung 8-1: Draufsicht auf die Versuchsstrecke mit Kennzeichnung der Aufgabenbearbeitung sowie der Hindernisse, blau: Hindernisse, rot: Regale

Die Hindernisse wurden über Paletten realisiert (siehe Abbildung 8-2) und Lagerbezeichnungen wurden gemäß Vorschriften an den Regalen angebracht.



Abbildung 8-2: Hindernisse im Parcours

8.2 Versuchsfahrzeug

Für die Studie wurde das unter Kapitel 7 beschriebene Demonstratorfahrzeug verwendet (siehe Abbildung 8-3). Demzufolge soll hier nicht weiter auf die Messsysteme eingegangen werden. Zur Aufnahme objektiver Daten wurden zusätzlich zwei Kameras (GoPro Hero 2) im Versuchsträger installiert, um die einzelnen Versuchs-

fahrten aufzeichnen zu können und die Bearbeitungsdauern der Aufgaben in manueller Nachbearbeitung aus den Videodaten ermitteln zu können. Die Aufzeichnung erfolgte mit 30 Frames/s. Die Anzeige entspricht dem unter 6.2.4 erläuterten Konzept. Die Videokameras waren dabei so eingestellt, dass sowohl die rechte Hand und die Bedienelemente sowie die Anzeige auf dem Videobild erkennbar waren.

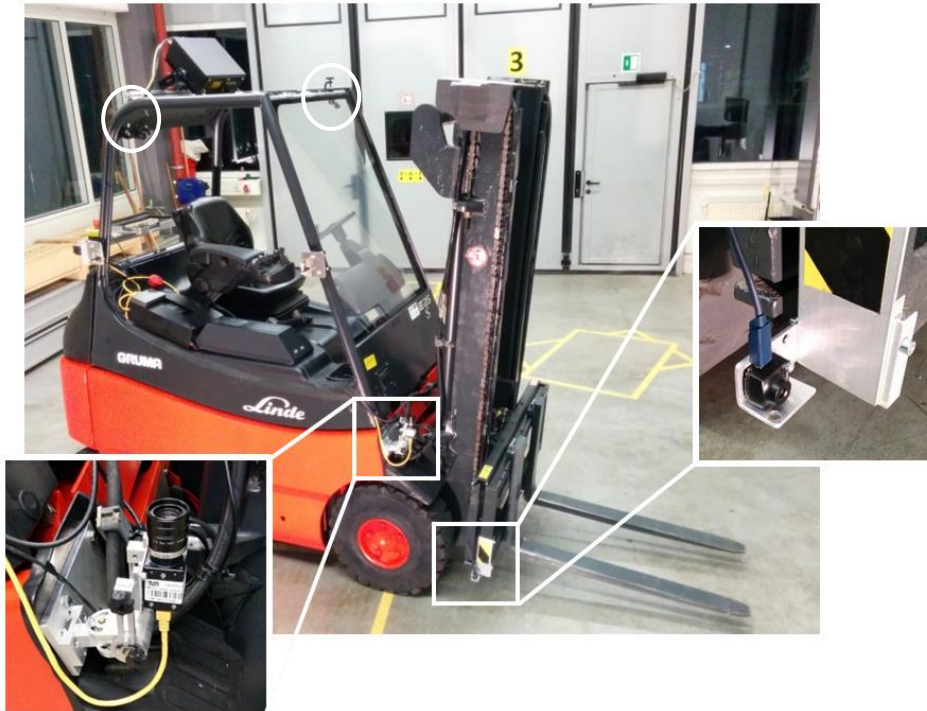


Abbildung 8-3: Demonstrator mit optischen, sensorbasierten Messsystem (Quadrate) zum Tracken von Markern sowie der Anbringung der GoPro Hero 2 zur Videoaufzeichnung (Kreis)

8.3 Hauptstudie – Methodik und Ergebnisse

Die Hauptstudie zur Evaluation beinhaltet eine Anwendung des Demonstrators in einer der Realität nachgebildeten Lagerumgebung. Verschiedene Anzeigekonzepte (mit und ohne Reihenfolge bei der Darstellung der Symbole), die den Fahrer während seiner Aufgaben unterstützen und auf dem unter 6.2.4 beschriebenen Konzept basieren, werden über die Erfassung von objektiven und subjektiven Messdaten überprüft. Zielsetzung war es, das entworfene Assistenzsystem in einem realistischen, aber abgesicherten Arbeitsumfeld auf seine Verständlichkeit und Praxistauglichkeit zu testen.

8.3.1 Versuchsdurchführung

Für die Durchführung der Versuche wurde im Vorfeld ein Versuchsprotokoll mit einer Checkliste, Erläuterungen sowie Probandeninformationen von Seiten des Lehrstuhls für Ergonomie angefertigt. Das Versuchsprotokoll gewährleistet einen standardisierten Ablauf der Untersuchungen sowie gleiche Bedingungen für jeden einzelnen Versuchsteilnehmer. Nach Begrüßung und kurzer Erläuterung des Projekts „AR im FFZ“ wurde zu Beginn der Proband über die Geheimhaltung der Versuchsinhalte aufgeklärt und erhielt eine Laserschutzunterweisung. Nachdem die demographischen Daten erfasst wurden, wurde der Versuchsablauf detailliert erläutert und die Testperson über die Bedeutungen der einzelnen Anzeige-Symbole belehrt, so dass alle Probanden über identische Vorinformationen verfügten. Anschließend wurde die Testperson in einer Eingewöhnungsfahrt ohne Systemunterstützung mit dem Versuchsfahrzeug vertraut gemacht. Eine weitere Eingewöhnungsfahrt mit Assistenz diente zur erstmaligen Nutzung derer während der Fahrt. Es folgte der Feldversuch, bei dem ein vorgegebener Parcours (siehe Abbildung 8-1) abgefahren und folgende Aufgaben ausgeführt werden mussten: Die Fahrtroute beinhaltete dabei diverse Hindernisse, die die Fahrbahn in ihrer Breite bzw. Durchfahrtshöhe einschränkten. Aufgabe 1 bestand darin, eine Palette aus einem Regal von der zweiten in die erste Regalebene umzulagern. Bei der zweiten Aufgabe musste eine Palette aus einem weiteren Regal aus Regalebene 1 aufgenommen und zur Zielposition gebracht werden. Für das Aufnehmen bzw. Abladen der Palette musste die Gabel des Staplers richtig positioniert, d.h. die Mastneigung, sowie die Höhen- und Seitenverschiebung sowie Eintauchtiefe korrekt eingestellt werden.

Insgesamt wurde die Versuchsstrecke vier Mal mit unterschiedlichen Unterstützungsgraden absolviert. Dabei wurden folgende Varianten unterschieden, die in randomisierter Ordnung durchgeführt wurden:

- 1) Mit System mit Reihenfolge (mSmR)
- 2) Mit System ohne Reihenfolge (mSoR)
- 3) Ohne System mit Reihenfolge (oSmR)
- 4) Ohne System ohne Reihenfolge (oSoR)

Bei den Varianten 1 und 2 wurde der Proband durch das Assistenzsystem unterstützt, während Variante 3 und 4 die entsprechenden Baseline-Fahrten ohne Unterstützung darstellen. Folgende Anweisung wurde vorab jedem Probanden für die Fahrten 1 und 2 mitgeteilt:

„Mit Hilfe der Anzeige erfolgt die Navigation durch den Parcours. Dabei wird durch verschiedene Warnsymbole auf Gefahren und Hindernisse hingewiesen. Während

der beiden Aufgaben unterstützt das System bei der Positionierung der Gabel: Es zeigt stetig die Ist-Position sowie die Richtung der Soll-Position an. Das Erreichen der Soll-Position wird durch ein „Gleichheitszeichen“ bestätigt.“

Zudem unterschied sich die Assistenz bezüglich der Reihenfolge der Darstellung der Anzeige. Auf diese Weise wurde bei den Varianten „mit Reihenfolge“ das Anzeigekonzept nach folgender Reihenfolge angezeigt:

- 1) Mastneigung
- 2) Höhenverschiebung
- 3) Seitenverschiebung
- 4) Eintauchtiefe

Es wurde der Hinweis gegeben, dass die Aufgaben in dieser Reihenfolge zu bearbeiten sind. Bei Variante „ohne Reihenfolge“ war dem Probanden die Abfolge in der Aufgabenbearbeitung freigestellt. Dennoch musste stets eine Bestätigung der drei Stufen durch das System erfolgen. Eine Erläuterung zu den Bezeichnungen mit und ohne Reihenfolge findet sich auch in 6.2.4.

Objektive Messdaten hinsichtlich der Bearbeitungsdauer wurden mithilfe von Videoaufzeichnungen erfasst. Zusätzlich war nach jeder Fahrt ein NASA-TLX-Fragebogen in deutscher Form nach [Sei-2003] von der Versuchsperson zu beantworten, um die subjektive Einschätzung zur Beanspruchung während der Versuchsfahrten zu erhalten. Bei den systemunterstützten Varianten 1 und 2 war zusätzlich ein SUS-Fragebogen zur Ermittlung der Usability des Systems auszufüllen. Hierbei stand vor allem die Frage nach dem unterstützenden Charakter der Anzeigen im Vordergrund. Während der Beantwortung der Fragebögen wurden die Paletten von den Versuchsleitern wieder an ihrem ursprünglichen Ort positioniert. Nach Absolvierung der vier Versuchsfahrten, folgte eine zusätzliche Evaluation der Eintauchtiefe der Gabel im Rahmen einer Zusatzaufgabe: Dabei hatte der Proband die Aufgabe, eine am Boden liegende Palette aufzunehmen, sodass die Zinken der Gabel bündig mit der Palette abschließen. Die Aufgabe wurde je ein Mal mit und ohne Assistenzsystem durchgeführt, ebenfalls in randomisierter Reihenfolge. Nach dieser Zusatzübung wurde ein Abschlussfragebogen mit der Evaluation zum gesamten Versuch ausgefüllt. Hier gab es die Möglichkeit positives Feedback und konstruktive Kritik in Bezug auf das Assistenzsystem anzubringen. Die Versuchsdauer lag bei ca. 90 Minuten pro Proband.

8.3.2 Datenaufbereitung und statistische Datenauswertung

Da keine Möglichkeit im Projekt bestand die CAN-Bus-Daten des Staplers abzugreifen und diese zu verwenden, erfolgte wie bereits unter 8.2 erläutert, eine Videoaufzeichnung der einzelnen Versuchsfahrten (30 Frames/s). Über die Software INTERACT (Mangold International GmbH) ist es nach Festlegung von Codes, die im Falle dieser Studie den Bearbeitungsdauern entsprechen, möglich die Bearbeitungsdauern im Video manuell zu triggern. Die erhaltenen Bearbeitungsdauern ermöglichen es letztendlich mithilfe der Statistiksoftware SPSS (Version 22, IBM Corp.) die erhaltenen objektiven und subjektiven Daten für die einzelnen Versuchsfahrten jeweils über einen t-Test für gepaarte Stichproben bezüglich der Nutzung des Assistenzsystem sowie der Einhaltung der Reihenfolge statistisch auf Unterschiede zu überprüfen. Der Vergleich für „mit Reihenfolge“ ist in blau gehalten und wird in den Diagrammen auf der linken Seite dargestellt, der Vergleich für „ohne Reihenfolge“ steht im Diagramm rechts in der Farbe orange. Für genauere Ergebnisse sei auf das nächste Kapitel verwiesen.

8.3.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Resultate sowie die statistischen Auswertungen zur Hauptstudie genauer erläutert.

8.3.3.1 Probandenkollektiv

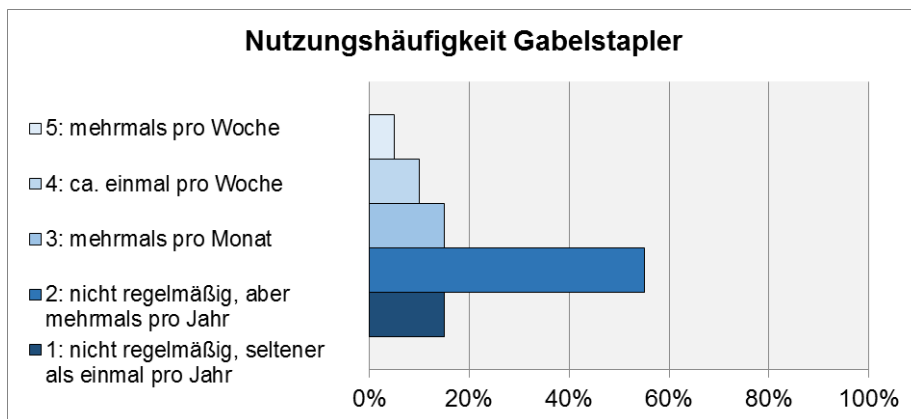


Abbildung 8-4: Häufigkeitsverteilung der Nutzung eines Gabelstaplers

Insgesamt haben an der Studie 20 Probanden mit einem Durchschnittsalter von 29 Jahren ($SD=\pm 10,42$) teilgenommen. Da eine Voraussetzung zur Teilnahme der Besitz eines Flurfördermittelscheins war und diese aus dem TUM-internen Umfeld aquiriert wurden, umfasst das Kollektiv 100 % männliche Teilnehmer. 10 % der Personen hatten eine Farbfeldsichtigkeit und 20 % waren auf eine Sehhilfe in Form einer Brille oder Kontaktlinsen angewiesen. Ihre Erfahrung im Umgang mit Flurförderzeugen

haben die Teilnehmer überwiegend mit einer durchschnittlichen Ausprägung angegeben (Abbildung 8-4). Den Staplerschein besaßen sie im Mittel seit 3 Jahren.

8.3.3.2 Objektive Daten

Wie in den folgenden vier Abbildungen erkennbar ist, zeigt sich jeweils eine Reduzierung der Bearbeitungsdauer für die einzelnen Aufgaben von „mit System mit Reihenfolge (mSmR)“ über „mSoR (mit System ohne Reihenfolge)“ zu oSmR und oSoR.

Hinsichtlich der Gesamtbearbeitungsdauer der Aufgaben ergaben beide Vergleiche der Dauern mit und ohne Assistenzsystem einen signifikanten Unterschied. Genauere Informationen hierzu sind in Tabelle 8-1 und Abbildung 8-5 ersichtlich. Die Gesamtbearbeitungsdauer umfasste die Dauer vom Start bis zum Erreichen des Ziels.

Tabelle 8-1: Statistische Auswertung des Vergleichs der Gesamtbearbeitungsdauern der Versuchsfahrten auf Unterschied

Gesamtbearbeitungsdauer	t-Test
Vergleich mSmR - oSmR	$t[19] = 4,276; p = 0,001 < 0,05 *$
Vergleich mSoR - oSoR	$t[19] = 6,041; p = 0,001 < 0,05 *$

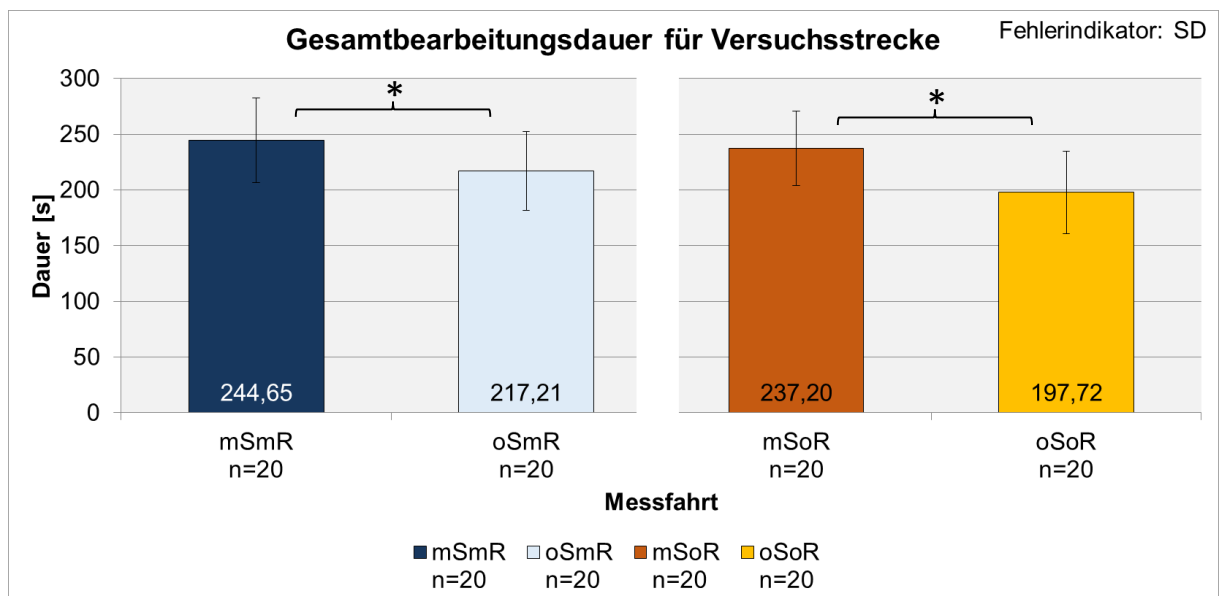


Abbildung 8-5: Gesamtbearbeitungsdauern [s] in den einzelnen Messfahrten [$\alpha=5\%$]

Ebenso veranschaulichen Tabelle 8-2 und Abbildung 8-6 die signifikanten Unterschiede jeweils für den Vergleich „mit Reihenfolge“ und „ohne Reihenfolge“ für den Einsatz des Assistenzsystems bei der Aufgabe Auslagerungsprozess 1. Die Ergebnisse der t-Tests sind im Folgenden aufgeführt.

Tabelle 8-2: Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied

Dauer Auslagerung 1	t-Test
Vergleich mSmR - oSmR	$t[19] = 2,546; p = 0,0197 < 0,05 *$
Vergleich mSoR - oSoR	$t[19] = 3,131; p = 0,0055 < 0,05 *$

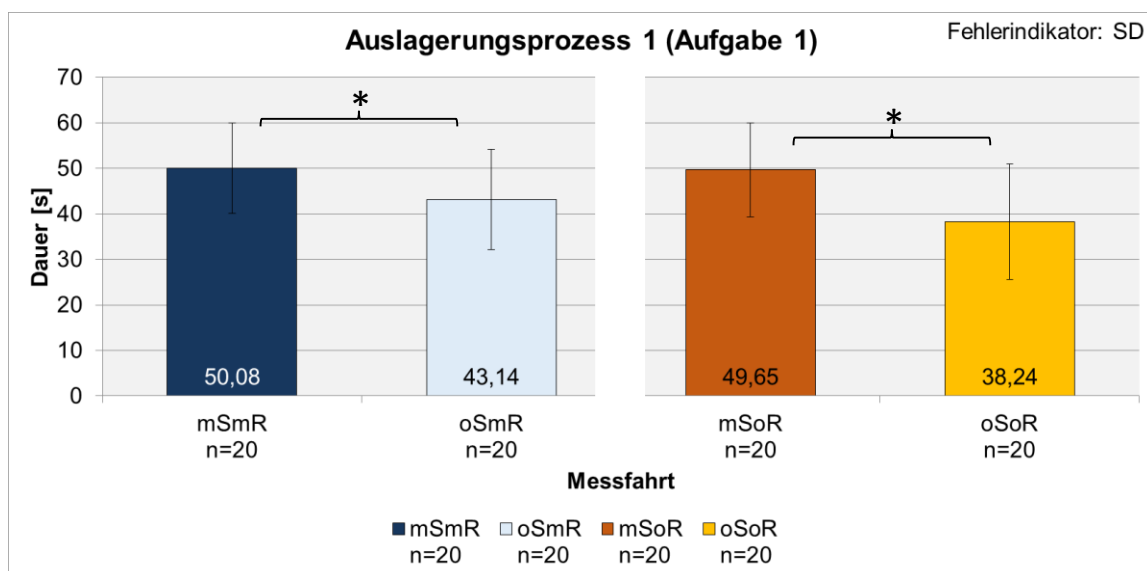


Abbildung 8-6: Dauer der Aufgabenbearbeitung [s] bei Aufgabe 1 zur Auslagerung (beinhaltet Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie der Auslagerung) [$\alpha=5\%$]

Wie bereits beim Auslagerungsprozess 1, der sich aus der Aufgabenbearbeitungsdauer für die Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie der Auslagerung an sich ergibt, ist auch bei der Auslagerungsaufgabe 2 ein Abfall der Messwerte zur Bearbeitungsdauer von „mit System mit Reihenfolge (mSmR)“ zu „ohne System ohne Reihenfolge (oSoR)“ erkennbar. Für den t-Test, der den Unterschied zwischen den Bedingungen mSmR und oSmR überprüft, ergibt sich kein signifikanter Unterschied. Im Gegensatz dazu zeigt der entsprechende Vergleich bei „ohne Reihenfolge“ einen signifikanten Unterschied (siehe Abbildung 8-7, Tabelle 8-3).

Tabelle 8-3: Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 2 aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied

Dauer Auslagerung 2	t-Test
Vergleich mSmR - oSmR	t[19] = 1,742; p = 0,0976 > 0,05
Vergleich mSoR - oSoR	t[19] = 3,781; p = 0,0013 < 0,05 *

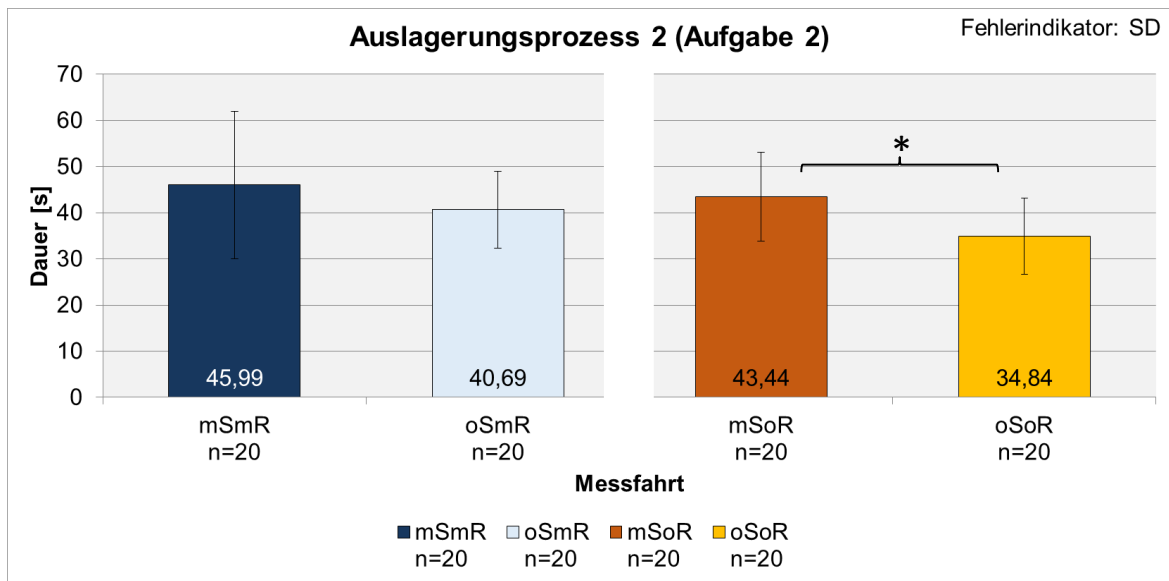


Abbildung 8-7: Aufgabebearbeitungsdauer [s] zum Auslagerungsprozess bei Aufgabe 2 (beinhaltet Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie der Auslagerung) [α=5%]

Ebenso treten beim Einlagerungsprozess vergleichbare Effekte auf. Für beide Vergleiche ergeben sich – wie in Tabelle 8-4 und Abbildung 8-8 – signifikante Unterschiede.

Tabelle 8-4: Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Einlagerungsprozess aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied

Dauer Einlagerung 1	t-Test
Vergleich mSmR - oSmR	t[19] = 6,726; p = 0,001 < 0,05 *
Vergleich mSoR - oSoR	t[19] = 6,832; p = 0,001 < 0,05 *

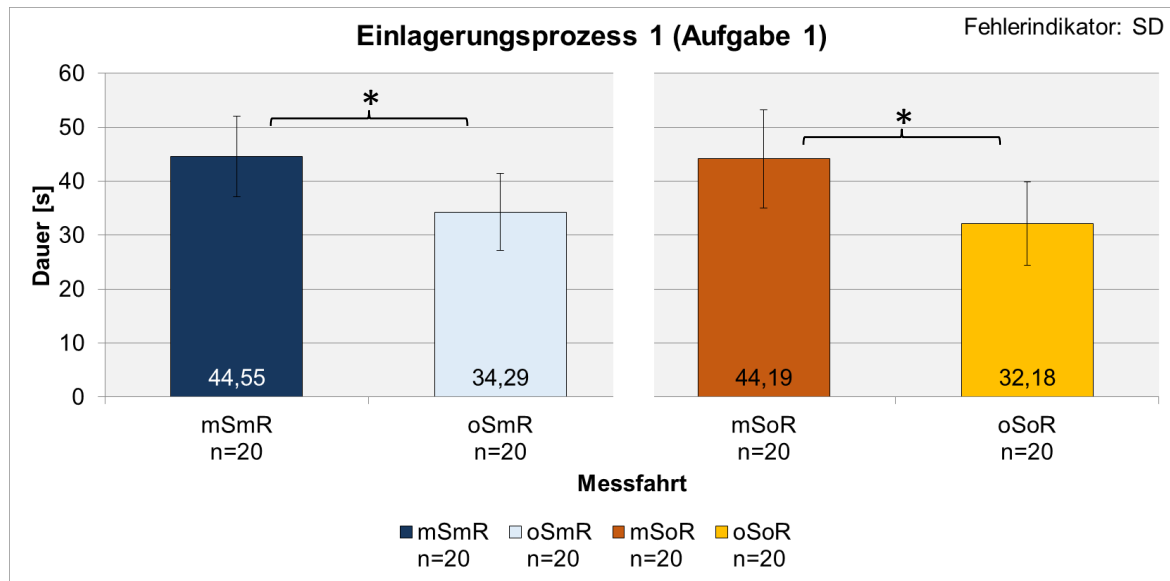


Abbildung 8-8: *Bearbeitungsdauer [s] für den Einlagerungsprozess bei Aufgabe 1 (bezieht sich auf Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie Einlagerung der Palette) [$\alpha=5\%$]*

Gleiche Ergebnisse sind für die einzelne Untersuchung der Hubhöhe und Mastneigung ersichtlich. Die Abbildungen hierzu finden sich im Anhang D.

Zusätzlich erfolgte zur Auswertung der objektiven Messdaten hinsichtlich der Aufgabenbearbeitungsdauer die Bewertung der Genauigkeit im Rahmen der durchgeführten Zusatzaufgabe. Bei den wie folgt eingestellten Toleranzen (Tabelle 8-5), die innerhalb der Aufgabenbearbeitung erreicht werden müssen, so dass ein positives Feedback dem Nutzer mitgeteilt und die nächste Anzeige dargestellt werden konnte, ergaben sich mit Assistenz höhere Genauigkeiten bei der Einstellung der Mastneigung sowie der Eintauchtiefe als ohne dem System. Abbildung 8-9 veranschaulicht dies detaillierter.

Tabelle 8-5: *Toleranzgrenzen des Systems im Hauptversuch*

	Mastneigung	Hubhöhe	Seitenverschiebung
Hauptversuch	-0,3°...+0,3°	± 1 cm	± 3 cm

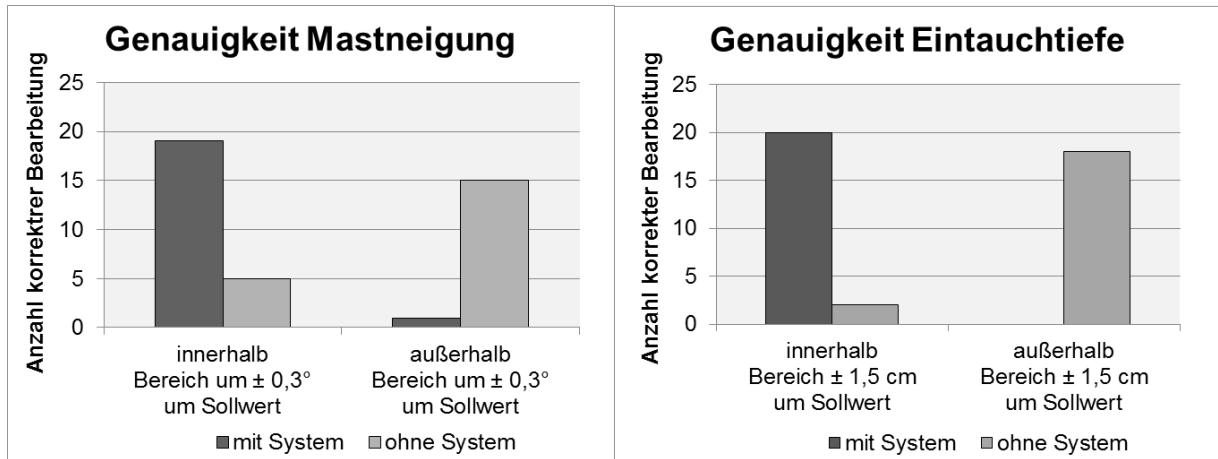


Abbildung 8-9: Ergebnisse zur Genauigkeit in der Aufgabenbearbeitung bei der Zusatzaufgabe

Diese Resultate aus den objektiven Daten zeigen deutlich, dass eine Anwendung des Anzeigeconzepts enorme Vorteile für die Bearbeitungsgenauigkeit besitzt. Dies könnte insbesondere in Anwendungsfällen wie beispielsweise beim Lasthandling von zerbrechlichen Bauteilen von großem Nutzen sein. Die Einbußen in der Bearbeitungsgeschwindigkeit sind jedoch nicht zu übersehen. Unerfahrene Fahrer können daraus dennoch ihren Nutzen ziehen.

8.3.3.3 Subjektive Daten

Im Gegensatz zu den objektiven Daten, kann bei den Ergebnissen zur subjektiven Einschätzung der Beanspruchung über den Fragebogen NASA-TLX kein signifikanter Unterschied in den unterschiedlichen Fahrten für die Bedingungen „Reihenfolge“ und „System“ bei t-Tests für gepaarte Stichproben ermittelt werden (Abbildung 8-10). Für die Auswertung des Fragebogens NASA-TLX wird der Overall Workload Index (OWI) herangezogen. Detaillierte Ergebnisse dazu finden sich in Tabelle 8-6. Es ist allerdings erkennbar, dass die Fahrten ohne Assistenzsystem über die subjektive Einschätzung der Beanspruchung der einzelnen Probanden geringfügig höher bewertet werden als mit dem System, was bedeutet, dass der Fahrer geringfügig höher belastet ist als mit Assistenz.

Tabelle 8-6: Statistische Auswertung des Vergleichs der OWI-Werte aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied

OWI	t-Test
Vergleich mSmR - oSmR	t[19] = -1,026; p = 0,318 > 0,05
Vergleich mSoR - oSoR	t[19] = -1,301; p = 0,194 > 0,05

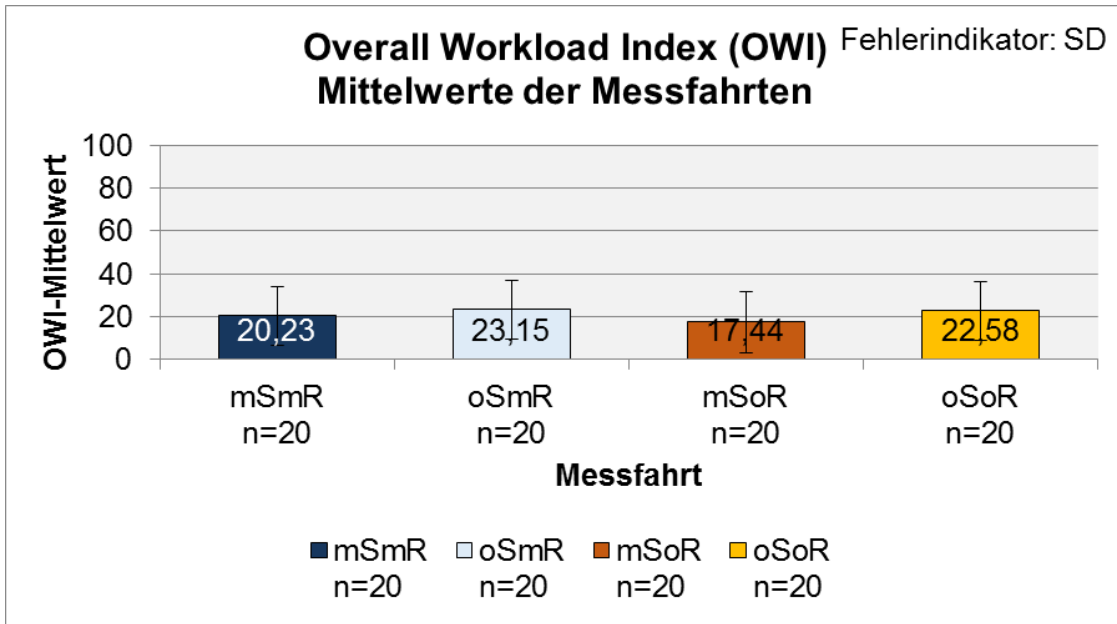


Abbildung 8-10: Ergebnisse zur subjektiven Beanspruchung während den Versuchsfahrten

In den Versuchsfahrten, in denen der System Usability Scale (SUS) Fragebogen zur Erfassung der Gebrauchstauglichkeit der Anzeigekonzepte angewendet wurde, ergab sich im Vergleich zu anderen Anzeigekonzepten ein relativ hoher SUS Score sowohl für das Anzeigekonzept „mit Reihenfolge“ als auch „ohne Reihenfolge“ (Abbildung 8-11).

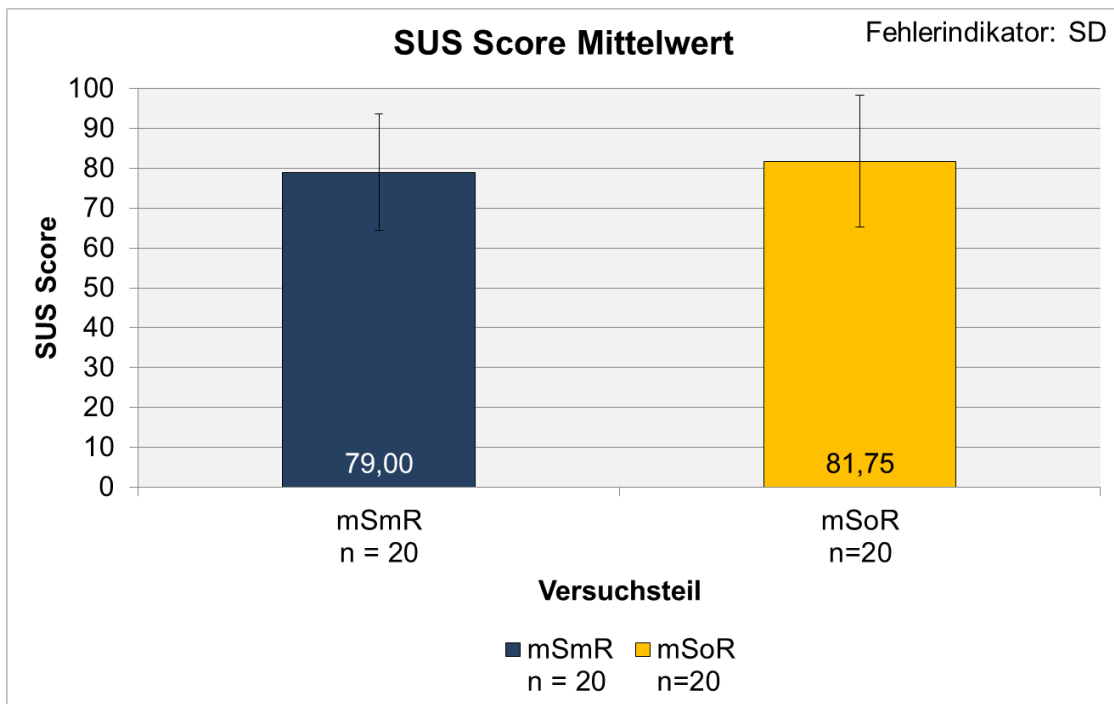


Abbildung 8-11: Ergebnisse zur Gebrauchstauglichkeit (Usability) der verschiedenen Anzeigekonzepte

Tabelle 8-7: Statistische Auswertung des Vergleichs der OWI-Werte aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied

SUS	t-Test
Vergleich mSmR - mSoR	$t[19] = -1,301; p = 0,209 > 0,05$

Nach [Ban-2009] kann ein SUS-Wert in dieser Größenordnung entsprechend als „gut“ eingestuft werden (vgl. Abbildung 8-12).

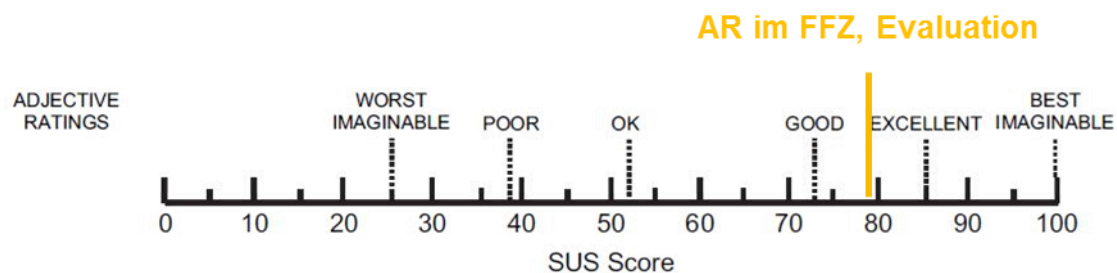


Abbildung 8-12: Die Usability der Anzeige allgemein wird laut [Ban-2009] als „gut“ eingestuft.

Dementsprechend lässt sich aus den subjektiven Daten – im Gegenteil zu den objektiven Messwerten – folgern, dass der Nutzer ein derartiges Anzeigesystem als Unterstützung gerne nutzen würde.

8.4 Nachstudie – Methodik und Ergebnisse

Wie die Ergebnisse der Auswertung der Hauptstudie zeigen, benötigten die Probanden bei den Aufgaben mit Nutzung des Assistenzsystems teilweise überdurchschnittlich lange, um die vom System vorgegebenen Soll-Positionen einzustellen. Vor allem die korrekte Einstellung der Mastneigung war dabei auffallend. Die Gründe dafür könnten möglicherweise die besonders eng gesteckten Toleranzgrenzen des Systems gewesen sein (siehe Tabelle 8-8). Um dies zu überprüfen bzw. nachzuweisen, dass eine Aufweichung der Toleranzgrenzen zu einer Verkürzung der Bearbeitungsdauern beiträgt, wurde eine Nachstudie erhoben, in der exemplarisch eine Aufgabe zur Bearbeitung an die Probanden übertragen wurde. Da in allen Bearbeitungsdauern ein vergleichbares Verhalten der Zeiten zu erkennen war, ist die Auswertung einer Aufgabe zunächst ausreichend.

Tabelle 8-8: Toleranzgrenzen des Systems im Hauptversuch sowie im Nachversuch

	Mastneigung	Hubhöhe	Seitenverschiebung
Hauptstudie	-0,3°...+0,3°	± 1 cm	± 3 cm
Nachstudie Toleranzklasse 1	-0,3°...+0,3°	± 1,8 cm	± 3 cm
Nachstudie Toleranzklasse 2	-0,6°...+1,2°	± 1,8 cm	± 3 cm
Nachstudie Toleranzklasse 3	-1,2°...+2,4°	± 1,8 cm	± 3 cm

8.4.1 Versuchsbeschreibung

Der Versuch wurde wie bereits die Hauptstudie zuvor in der Versuchshalle des Lehrstuhls fml der TUM in Garching durchgeführt. Da alle Probanden der Nachstudie bereits im Hauptversuch teilgenommen hatten entfiel die Beschreibung des Projekts. Nachdem der Testperson kurz die Symbolik des Assistenzsystems in Erinnerung gerufen worden war, wurde mit dem Versuchsablauf begonnen. Die Übung beschränkte sich hierbei aus Zeitgründen und im Hinblick auf die Auswertung auf die Aufgabe 1 aus der Hauptstudie (siehe 8.3.1), bei der eine Palette von der zweiten Ebene eines Regals in die erste Ebene umgelagert werden musste.

Insgesamt musste die Aufgabe acht Mal absolviert werden. Dabei wurden folgende Varianten unterschieden, die in randomisierter Ordnung durchgeführt wurden: Einerseits wurde bei der Nutzung mit Assistenz zwischen 3 Toleranzklassen unterschieden (siehe Tabelle 8-8). Sie beziehen sich auf die Winkelstellung der Mastneigung. Des Weiteren wurden die Varianten mit und ohne Reihenfolge unterschieden (siehe Hauptstudie). So ergeben sich insgesamt acht mögliche Kombinationen, 2 ohne und 6 mit Assistenzsystem mit folgenden Abkürzungen: mSmR_TK1, mSoR_TK1, mSmR_TK2, mSoR_TK2, mSmR_TK3, mSoR_TK3, oSmR, oSoR.

- | | |
|---|---------------------|
| 1) Mit System – Toleranzklasse 1: [-0,3...+0,3] | |
| 2) Mit System – Toleranzklasse 2: [-0,6...+1,2] | a) mit Reihenfolge |
| 3) Mit System – Toleranzklasse 3: [-1,2...+2,4] | b) ohne Reihenfolge |
| 4) Ohne System | |

Die Toleranzklasse 1 (TK1) in der Nachstudie entspricht hierbei den Gegebenheiten aus der Hauptstudie (vgl. Tabelle 8-8). Die Toleranz für die Hubhöhe [$\pm 1,8$ cm] und die Seitenverschiebung [± 3 cm] wurden auf die maximalen Werte eingestellt und blieben zur Vergleichbarkeit für alle 8 Durchläufe unverändert. Bei jedem Durchlauf wurde jeweils aus derselben vorgegebenen Startposition mit der Aufgabenbearbeitung begonnen, wobei der Gabelstapler frontal vor dem Regal im Abstand von ca.

1,50 m stand. Die Ausgangsstellung der Gabel war so gewählt, dass der Mast komplett nach vorne geneigt und die Seitenverschiebung ganz nach links ausgerichtet ist. Die Gabel lag auf dem Boden auf. Wie bereits in der Hauptstudie wurden die 4 verschiedenen Anzeigekonzepte kombiniert über die Verwendung des Unterstützungssystems und der Reihenfolge der Aufgabenausführung. Auf diese Weise wurde bei der Variante „a) mit Reihenfolge“ der Proband aufgefordert zunächst die Mastneigung, dann die Höhenverschiebung und schließlich die Seitenverschiebung korrekt einzustellen. Bei Variante „b) ohne Reihenfolge“ war dem Probanden die Abfolge der Positionierung freigestellt. Dennoch musste stets eine Bestätigung der drei Stufen durch das System erfolgen. Nach erfolgreichem Abschluss eines Durchlaufs lagerte der Proband die Palette wieder selbstständig in die zweite Regalebene um und parkte den Gabelstapler in Startposition, bevor der folgende Durchlauf gestartet wurde. Neben den Aufzeichnungen per Kamera (GoPro Hero 2) mit 30 Frames/s wurden neben demographischen Daten keine weiteren Daten erhoben, da für die Auswertung lediglich die benötigten Zeiten bei den verschiedenen Varianten von Interesse sind. Die Versuchsdauer lag bei ca. 30 Minuten pro Proband.

8.4.2 Datenaufbereitung und deskriptive Datenauswertung

Die Versuche wurden wie bereits unter 8.3.2 beschrieben mit einer Kamera der Art GoPro Hero 2 mit 30 Frames/s aufgezeichnet. Die Weiterbearbeitung erfolgte ebenso wieder mithilfe der Software INTERACT (Mangold International GmbH). Ziel dieser Nachstudie ist es, zu ermitteln, ob eine Vergrößerung der Toleranzen für die Einstellung der Mastneigung sowie eine Maximierung der Toleranz für Hubhöhe, Seitenverschiebung und Eintauchtiefe Auswirkungen auf die Aufgabenbearbeitungsdauer haben. Die oben beschriebene Toleranzklasse 1 entspricht dabei den Untersuchungsparametern wie diese in der Hauptstudie angewendet wurden. Die deskriptive Datenaufbereitung erfolgte mit MS Excel 2010. Da Probanden aus der Hauptstudie herangezogen wurden, ist von einer zusätzlichen subjektiven Datenaufzeichnung abgesehen worden.

8.4.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Nachstudie genauer erläutert.

8.4.3.1 Probandenkollektiv

Als Probandenkollektiv wurden 10 Testpersonen mit Flurfördermittelschein aus TUM-internem Umfeld herangezogen, die bereits an der Hauptstudie teilgenommen hatten. Die Teilnehmer hatten ein Durchschnittsalter von 30 Jahren ($SD=\pm 11,49$) und die Studie umfasste ein 100 % männliches Probandenkollektiv. 20 % der Teilnehmer

hatten eine Farbfehlsichtigkeit und ebenso 20 % waren auf eine Sehhilfe angewiesen. Alle Probanden waren im Besitz einer Fahrerlaubnis für Flurförderzeuge. Ihre Erfahrung im Umgang mit Flurförderzeugen haben die Teilnehmer überwiegend mit einer „nicht regelmäßigen Nutzung, aber mehrmals pro Jahr“ angegeben. Den Staplerschein besaßen sie im Mittel seit 2011 ($SD=\pm 1,39$).

8.4.3.2 Objektive Daten

Die Auswertung der Nachstudie ergibt, dass sich die Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess von Toleranzklasse 1 bis zur Toleranzklasse 3 reduzieren. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die Ergebnisse detailliert (Abbildung 8-13, Abbildung 8-14). Basierend auf den Ergebnissen der Hauptstudie lässt sich folgern, dass dies auch für alle weiteren Aufgaben der Fall sein wird.

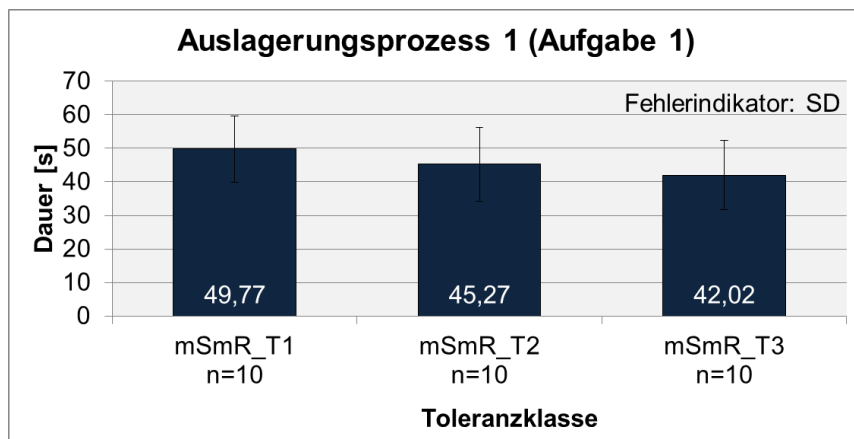


Abbildung 8-13: Ergebnisse zur Bearbeitungsdauer bei unterschiedlichen Toleranzgrenzen bei der Bedingung „mit Reihenfolge“

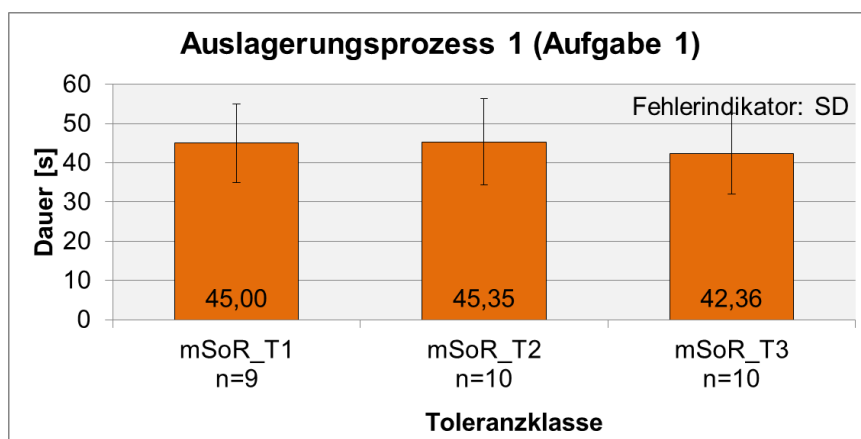


Abbildung 8-14: Ergebnisse zur Bearbeitungsdauer bei unterschiedlichen Toleranzgrenzen bei der Bedingung „ohne Reihenfolge“

8.5 Zusammenfassung

Anhand der Ergebnisse der Nachstudie für die Bearbeitungsdauer der Auslagerungsaufgabe 1 lässt sich exemplarisch erkennen, dass eine Aufweichung der Toleranzgrenzen grundsätzlich zu einer Verkürzung der Bearbeitungsdauern führt. Um die Ergebnisse aus Haupt- und Nachstudie miteinander vergleichen zu können, wurde jeweils ein t-Test für unabhängige Stichproben für die entsprechenden Bedingungen durchgeführt, wofür sowohl für den Haupt- als auch für den Nachversuch objektive Daten vorlagen. Für alle vier Vergleiche zwischen Haupt- und Nachstudie ergaben sich nicht signifikante Ergebnisse in Bezug auf den Unterschied. Aus diesem Ergebnis kann gefolgert werden, dass sich die Daten der beiden Studien nicht sehr unterscheiden. Deskriptiv lässt sich erkennen, dass sich die Werte für Bearbeitungsdauern mit Vergrößerung der Toleranzbereiche verkürzen und zunehmend den Dauern ohne Assistenzsystem angleichen mit dem Unterschied, dass höhere Genauigkeiten eingehalten werden können als ohne Unterstützung. Die deskriptiven Auswertungen sind in Abbildung 8-15 für die Messfahrten „mit Reihenfolge“ zusammengefasst.

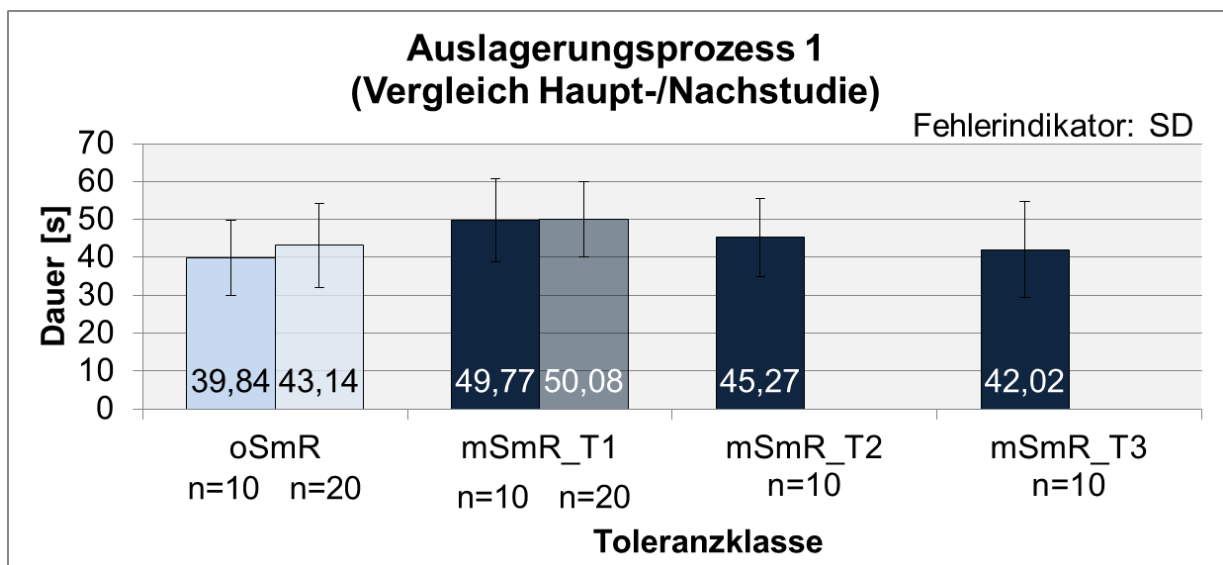


Abbildung 8-15: Vergleich der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 im Haupt- und Nachversuch für die Bedingungen „mit Reihenfolge“ mit Unterteilung der unterschiedlichen Toleranzklassen: Die ausgefüllten Balken stellen die Werte der Nachstudie dar, während die transparenten Balken die Werte der Hauptstudie widerspiegeln.

Abbildung 8-16 zeigt die entsprechenden Werte für die Bedingungen „ohne Reihenfolge“ sowohl für die Haupt- als auch für die Nachstudie.

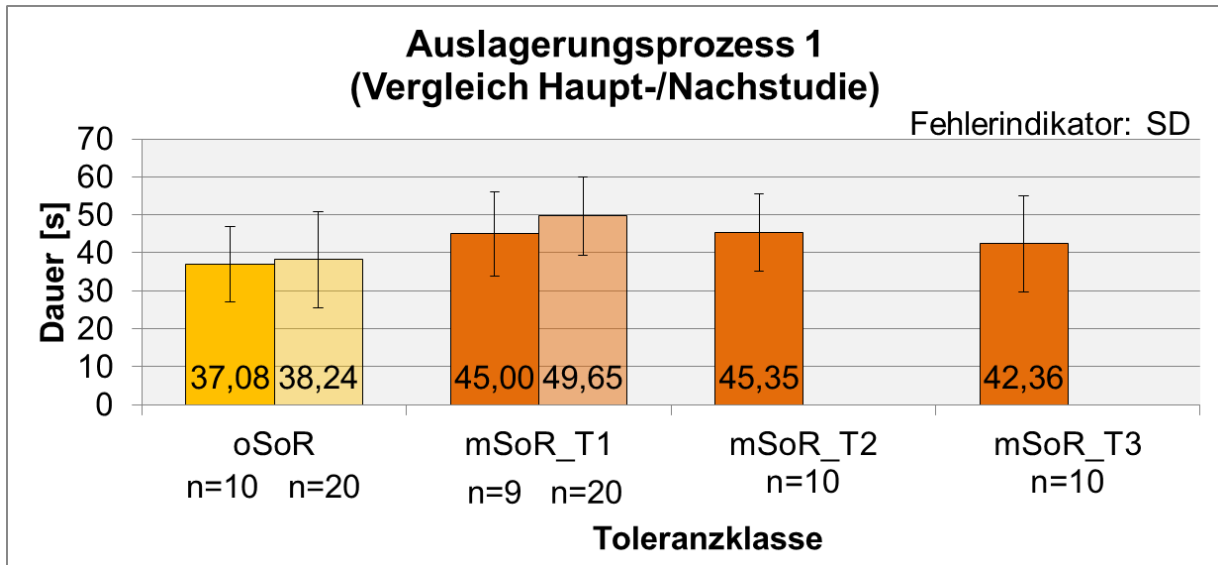


Abbildung 8-16: Vergleich der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 im Haupt- und Nachversuch für die Bedingungen „ohne Reihenfolge“ mit Unterteilung der unterschiedlichen Toleranzklassen: Die ausgefüllten Balken stellen die Werte der Nachstudie dar, während die transparenten Balken die Werte der Hauptstudie widerspiegeln.

9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Die Bereitstellung von Informationen für den Fahrer von Flurförderzeugen gewinnt im Bereich der Logistik immer mehr an Bedeutung mit dem Ziel Arbeitsprozesse mit größter Effizienz realisieren zu können. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts zeigen die Möglichkeiten einer Informationsdarstellung direkt im Sichtbereich des Fahrers von Flurförderzeugen auf. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts wurde ein Gegengewichtsgabelstapler ausgewählt, um ein ergonomisches Anzeigekonzept zu entwickeln, das dem Fahrer Unterstützung bei der Ausführung seiner Tätigkeiten bietet. Aufgrund des breiten Anwendungsspektrums von Flurförderzeugen bietet die Konzentration von Informationen direkt im Sichtbereich des Fahrers Vorteile gegenüber bisher am Markt erhältlichen Systemen und Displays. Trotz einiger Einschränkungen in der direkten Überlagerung der Realität mit Zusatzinformationen kann das entwickelte Anzeigekonzept der Augmented-Reality-Technologie zugeordnet werden mit der Begründung, dass die Darstellung Bezug zur Lagerumgebung und zum Arbeitsablauf nimmt.

Über Tätigkeitsanalysen zur Anwendung von Gegengewichtsgabelstaplern in Lager- und Produktionsstätten war es möglich, Einsatzszenarios zu ermitteln, bei welchen der Fahrer Unterstützung benötigt. Basierend darauf wurde über die Abwägung von Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und Nutzen das Szenario Lasthandling detailliert weiterverfolgt. Der Fahrer wird in diesem Einsatzszenario über die reale Position und Lage der Gabelzinken bzw. des Hubmastes sowie über Hindernisse und Warnungen informiert. Zudem werden Anweisungen zum Bedienvorgang und positive Rückmeldungen für eine korrekte Bearbeitung gegeben. Ausgehend davon leiten sich die Anforderungen an das Gesamtsystem ab, welche die Erfassung der geometrischen Zustandsparameter der Gabelzinken und des Hubmastes beinhalten. Zusätzliche Anforderungen werden über ergonomische Gesetzmäßigkeiten festgelegt, um die Informationsaufnahme für den Menschen optimal zu gestalten. Beruhend darauf werden sowohl ein technisches Konzept sowie eine ergonomische Anzeige für das Augmented-Reality-gestützte Assistenzsystem entwickelt. Zur Umsetzung der Konzepte wird die Technologie des Emissive Projection Displays ausgewählt, wobei eine folienbeschichtete Frontscheibe über das Anleuchten eines Laserstrahls zum transparenten Display erweitert wird. Mithilfe der Umsetzung des Anzeigekonzepts sowie der Messsystematik in einem Demonstratorfahrzeug kann eine Evaluation des ent-

wickelten Anzeigekonzepts im Rahmen von zwei Probandenstudien zur Bearbeitung von Lasthandlingvorgängen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass sich die ermittelten Aufgabenbearbeitungsdauern mit Systemunterstützung mit zunehmend größer werdenden Toleranzen den Dauern ohne Assistenz angleichen. Zudem kann der Vorteil der Sicherstellung einer höheren Qualität in der Bearbeitung ermittelt werden.

9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Die im Rahmen des Forschungsprojekts ermittelten Ergebnisse können aufgrund des Einsatzes von Flurförderzeugen in erster Linie von Fachgebieten der Produktion und Logistik genutzt werden. KMUs aus dem Bereich der AR-Hard- und Softwareentwicklung und -herstellung bietet sich ebenfalls die Möglichkeit, die Ergebnisse hinsichtlich der Elektrotechnik oder der Informations- und Kommunikationstechnik zu nutzen. Zudem können Hersteller von Flurförderzeugen auf die Erkenntnisse bei der Einbindung der AR-Technologie in Staplerkabinen zurückgreifen. Dies spiegelt sich auch in der Nutzung der Forschungsergebnisse in den verschiedenen Wirtschaftszweigen wider. Da Flurförderzeuge in nahezu allen Branchen eingesetzt werden, können die Ergebnisse seitens der Anwender auch entsprechend branchenübergreifend genutzt werden. Zudem bieten die frei zugänglichen Forschungsergebnisse auch Herstellern von Spezialstaplern Informationen zur AR-Technologie und der Umsetzung in Staplern.

Die Einblendung von relevanten Informationen in das Sichtfeld des Fahrers, bietet dem Fahrer eine Unterstützung zu einer effektiveren und effizienteren Bearbeitung. Durch die ergonomisch optimale Positionierung im Bereich des parafovealen Sichtfeldes des Fahrers kann die ständige Neufokussierung zwischen Arbeitsbereich und angezeigten Daten, welches bei der Variante mit einem Staplerterminal vorliegt, verringert werden. Dadurch kann der Fahrzeugbediener uneingeschränkt seine Arbeitsaufgabe ausführen. Zudem werden die betriebliche Sicherheit und die Effizienz der Abläufe im Lager gesteigert.

Mithilfe dieses ersten, exemplarischen Aufbaus sind Vorarbeiten und umfangreiches Know-how geschaffen worden. Komplexe Problemstellungen in der Konzeption als auch in der Umsetzung konnten bereits im Forschungsvorhaben aufgedeckt werden. Für die industrielle Umsetzung ist eine Adaption des AR-Systems in eigene Gabelstaplermodelle und eine Weiterentwicklung der Anzeigetechnologie erforderlich.

9.3 Ausblick

Durch das Forschungsprojekt „Augmented Reality im Flurförderzeug“ konnte ein erster Ansatz zur Unterstützung des Fahrers von Flurförderzeugen realisiert werden. Das in den Demonstrator implementierte Anzeigekonzept wurde bisher in zwei Probandenstudien validiert. Über technische Maßnahmen soll in Zukunft die vom Menschen wahrnehmbare Latenz zwischen der Realität und der Anzeige auf ein Minimum reduziert werden. Weitere Untersuchungen können Annahmen zu Verbesserungen bestätigen. Der Abgriff von Bedien- und Steuersignalen aus dem Bordnetz kann dazu genutzt werden, eine zielgerichtete und intuitive Anzeige für den Fahrer von Gabelstaplern zu realisieren.

Das Visualisierungsmedium bietet noch Verbesserungspotenzial. In einem ersten Schritt kann der Laserprojektor durch schon erhältliche mikroelektromechanische (MEMS) Spiegelsysteme ersetzt werden, um Bauraum einzusparen. Des Weiteren kann als Bildquelle ein DLP-Projektor mit starker UV-Lichtquelle eingesetzt werden, um den schmalbandigen und damit potenziell gefährlichen Laser zu ersetzen und eine komplexe Pixelgrafik zu ermöglichen. Hierfür muss eine Optik für das Projektorsystem entwickelt werden, um auch schräge Projektionen zu erlauben. Die Qualität und Durchsichtigkeit der mit Nanopartikeln bestückten Folie sollte dahin gehend verbessert werden, dass keine sichtbaren Einschlüsse mehr zu erkennen sind und eine vollständige Transparenz gegeben ist. Langfristig vorausblickend wird die Technologie der transparenten Displays, bei denen die Bildquelle integriert ist und keine Projektion mehr nötig ist, eine Alternative sein.

Die im vorliegenden Forschungsvorhaben vorgestellte Technologie ist nicht auf Flurförderzeuge begrenzt. Die Adaptierung auf andere Industriefahrzeuge und Baumaschinen bietet weiteres Potenzial.

Literaturverzeichnis

- [Abl-2007] Ablassmeier, M., Poitschke, T., Wallhoff, F., Bengler, K., Rigoll, G.: Eye Gaze Studies Comparing Head-Up and Head-Down Displays in Vehicles. Proc. IEEE ICME 2007, Beijing, China, 2007.
- [Adl-2010] Adler, M.: Ergonomiekompodium - Anwendung ergonomischer Regeln und Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Produkten. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund, 2010.
- [Ado-2011] Adolph, L. Dr.; Wille, M. Dr.; Grauel, B.: Datenbrillen – Aktueller Stand von Forschung und Umsetzung sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen, Dortmund, Berlin, Dresden, 2011.
- [AIM-2014] AIM-D e.V.: RTLS Real Time Locating Systems. URL: <http://www.aim-d.de/images/stories/AIM-brochures/WhitePapers/aim%20wp%20s1-9%20rtls-2014%20v2-1.pdf>, Aufruf am 04.12.2014.
- [Alt-2002] Alt, T.: Augmented Reality in der Produktion. Dissertation, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Magdeburg, 2002.
- [Azu-1997] Azuma, R.: A Survey of Augmented Reality, 1997.
- [Azu-2001] Azuma, R.: Recent Advances in Augmented Reality, 2001.
- [Ban-2009] Bangor, A.; Kortum, P. & Miller, J.: Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. In: JUS Journal of Usability Studies, Jg. 4 (2009) Nr. 3, S. 114–123.
- [Bar-2011] Barck, R.: Eine Frage der Energie. In: LOGISTIK Heute, Jg. 10 (2011) Nr. 1-2, S. 60–61.
- [Ber-1970] Bernotat, R.: Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. In: Ergonomics (1970) Nr. 13, S. 353–377.
- [Ber-2009] Bergmeier, U.: Kontaktanalog markierendes Nachtsichtsystem - Entwicklung und experimentelle Absicherung. Dissertation.

- Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2009.
- [BGH-2012] BGHW Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution: Handbuch für Gabelstaplerfahrer, BGHW Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution, 2012.
- [BGH-2014] BGHM - Berufsgenossenschaft für Holz und Metall: Top-Sicht: Was der Staplerfahrer sieht, 2014.
- [BGV B2] BGV, B2: Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung, BGM Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd, 2007.
- [BGV D27] BGV, D27: Flurförderzeuge, BGHW Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution, 2002.
- [Bim-2005] Bimler, O.; Raskar, R.: Modern Approaches to Augmented Reality. SIGGRAPH, New York, 2005.
- [Bun-2007] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Arbeitsstättenrichtlinie ASR A1.3 - Sicherheits- und Gesundheitsschutzkennzeichnung. Bundesministerium für Arbeit und Soziales, 2007.
- [Con-2014] Continental Aktiengesellschaft: Augmented Reality - Head-up-Display, Continental Aktiengesellschaft. URL: <http://continental-head-up-display.de/>, Aufruf am 01.12.2014.
- [Dem-2014] Demmelmair, S.: Probandenstudie zur Untersuchung der Ablenkung sowie des Fahrverhaltens bei Präsentation von Informationen in einem Head-Up Display im Vergleich zu einem "Emissive Projection Display". Semesterarbeit. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [DIN EN 60825] DIN EN60825: Sicherheit von Lasereinrichtungen, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2006.
- [DIN EN ISO 15008] DIN EN ISO15008: Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen - Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin, 2011.

- [DIN EN ISO 3864-1] DIN EN ISO, 3864-1: Graphische Symbole - Sicherheitfarben und Sicherheitszeichen, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Beuth, Berlin, 2012.
- [DIN EN ISO 8373] DIN EN ISO8373: Roboter und Robotikgeräte, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [Ebe-2014] Eberspächer, T.; Schwan, W.: Implementierung eines Head-Tracking-Systems in eine Gabelstaplerkabine. Interdisziplinäres Projekt. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [Eck-2013] Ecker, R.: Der verteilte Fahrerinteraktionsraum. Dissertation. Lehrstuhl für Mathematik, Informatik und Statistik, Ludwig-Maximilians-Universität, München, 2013.
- [Fri-2004] Friedrich, W.: ARVIKA - Augmented Reality für Entwicklung, Produktion und Service. PUBLICIS PRO Publishing Books, Erlangen, 2004.
- [Gra-2008] Graulich, J. Dr.: Das Sicht-Experiment. URL: <http://www.bgn.de/9107/22186/1>, Aufruf am 04.12.2014.
- [Gra-2014] Graser, T.: Erstellung und Sichtanalyse eines Anzeigekonzeptes für die Frontscheibe eines Flurförderfahrzeuges. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [Gro-1978] Grochla, E.; Hora, E.: Elemente der organisatorischen Gestaltung. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg, 1978.
- [Gün-2009] Günthner, W. A.; Blomeyer, N.; Reif, R.; Schedlbauer, M.: Pick-by-Vision - Augmented Reality unterstützte Kommissionierung. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2009.
- [Gün-2011] Günthner, W. A.; Wölfle, M.: Papierlose Produktion und Logistik. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2011.
- [Gün-2012] Günthner, W. A.; Rammelmeier, T.: Vermeidung von Kommissionierfehlern mit Pick-by-Vision. Forschungsbericht. Lehrstuhl

für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2012.

- [Gün-2014a] Günthner, W. A.; Hohenstein, F.; Jung, M.: Das Staplerauge. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [Gün-2014b] Günthner, W. A.; Deuse, J.; Rammelmeier, T.; Weisner, K.: Entwicklung und technische Integration einer Bewertungsmethodik zur Ermittlung von Mitarbeiterbelastungen in Kommissioniersystemen (ErgoKom). Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [Hah-2012] Hahn, G.-A.: Kurzlehrbuch Augenheilkunde. Kurzlehrbuch. Thieme, Stuttgart, 2012.
- [Hol-1998] Hollnagel, E.: Cognitive reliability and error analysis method - CREAM. Elsevier, Oxford, New York, 1998.
- [Hum-2011] Human Solutions GmbH: Ramsis in Catia V5 - Handbuch Version 3.8. Human Solutions GmbH, 2011.
- [Hum-2012] Human Solutions GmbH: Ramsis in Catia V5 - Schulungshandbuch. Human Solutions GmbH, 2012.
- [IDS-2014] IDS Imaging Development Systems GmbH: iDS - Direct: XS. URL: http://store-de.ids-imaging.com/IDS/spec_pdf.php?sku=AB00391, Aufruf am 11.12.2014.
- [ISO 26022] ISO26022: Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control system - Simulated lane change test to assess in-vehicle secondary task demand., ISO International Organization for Standardization, 2010.
- [Isr-2012] Israel, B.: Potenziale eines kontaktanalogen Head-up Displays für den Serieneinsatz. Dissertation. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2012.
- [Joh-1993] Johannsen, G.: Mensch-Maschine-Systeme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993.

- [Kau-2011] Kaufmann, T.: Staplerfahrer-ABC. Beuth, Berlin, 2011.
- [Kau-2013] Kaufmann, T.: Flurförderzeuge - Optimale Planung und effizienter Einsatz ; [mit Prüfungsfragen]. Beuth, Berlin, Wien, Zürich, 2013.
- [Kno-2015] Knott, V.; Demmelmair, S.; Bengler, K.: Emissive Projection Display im Fahrzeug – Auswirkungen auf die Aufmerksamkeit des Fahrers. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (GfA) (Hrsg): Gesellschaft für Arbeitswissenschaft (Hg.) 2015 – Tagungsband GfA-Tagung 2015 in Karlsruhe. Dortmund: GfA-Press, 2015.
- [Kra-1998] Kraiss, K. F.: Benutzergerechte Automatisierung Grundlagen und Realisierungskonzepte. In: Automatisierungstechnik, Jg. 46 (1998) Nr. 10, S. 457–467.
- [Küh-2003] Kühn, M.; Rose, A.; Seifert, K.: Untersuchung des Fußgänger-Fahrzeug-Unfalls hinsichtlich des Fahrerverhaltens, Zentrum für Mensch-Maschine-Systeme; TU Berlin. URL: http://www.mangold-international.com/fileadmin/Media/References/Publications/Downloads/Untersuchung_Fussgaenger_Fahrzeug_Unfall_hinsichtlich_des_Fahrverhaltens.pdf, Aufruf am 21.01.2015.
- [May-2014] Mayer, C.: Fahrsimulatorstudie zur Ablenkung durch Projektionen auf der Windschutzscheibe. Bachelorarbeit. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2014.
- [Mic-2012] Microsoft Corporation: Kinect Sensor. URL: <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/hh438998.aspx>, Aufruf am 11.12.2014.
- [Mil-1994] Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F.: Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. Telem manipulator and Telepresence Technologies 2351, 1994.
- [Mil-1999] Milgram, P.; Colquhoun, H., JR.: A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration, 1999.

- [MQTT 3.1.1.] MQTT3.1.1.: MQTT Version 3.1.1, OASIS, Burlington, USA, 2014.
- [Ove-2013] Overmeyer, L.; Mänken, F.: Intelligente Schnittstellen in wandlungsfähigen Lieferketten - ISI-WALK - Abschlussbericht. PZH-Verl; TEWISS - Technik-und-Wissen-GmbH, [Garbsen], Garbsen, 2013.
- [Pat-2004] Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Dissertation. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München, Garching, 2004.
- [Rei-2009] Reif, R.: Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2009.
- [Rei-2010] Reif, K.: Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage, Wiesbaden, 2010.
- [Rem-2009] Remlinger, W.; Bubb, H.; Wirsching, H.-J.: Sichtauslegung von Anzeigen mit "RAMSIS kognitiv" - Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit ; 5. VDI-Tagung, Braunschweig, 4. und 5. November 2009, Düsseldorf, VDI-Tagung Fahrer im 21. Jahrhundert, 2009.
- [Rou-1981] Rouse, W. B.: Human-Computer Interaction in the Control of Dynamic Systems. In: ACM Computing Surveys, Jg. 13 (1981) Nr. 1, S. 71-99.
- [Sch-2009] Schneid, M.: Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug. Dissertation. Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Garching, 2009.
- [Sch-2011] Schneider, D.: Markierungslicht - eine Scheinwerferlichtverteilung zur Aufmerksamkeitssteuerung und Wahrnehmungssteigerung von Fahrzeugführern. Dissertation. Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München, Garching, 2011.

- [Sei-2003] Seifert, K.: Evaluation multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen - Ein empirischer Ansatz zur Ableitung von Gestaltungshinweisen für multimodale Computer-Systeme. Dissertation. Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin, Berlin, 2003.
- [Sun-2013] Sun, T. X.; Cheng, B.: Novel Emissive Projection Display Digitizes Glass Windows. In: Information Display, Jg. 6 (2013) Nr. 6, S. 18–24.
- [Sun-2014] Sun Innovations, I.: Internetauftritt. URL: <http://www.sun-innovations.com/>, Aufruf am 11.12.2014.
- [Tex-2014] Texas Industries Incorporated: DLP Front Projection System. URL: http://www.ti.com/solution/dlp_front_projection_system, Aufruf am 11.12.2014.
- [Tho-2010] Thoma, S.: Mensch-Maschine-Interaktionskonzepte für Fahrerassistenzsystem im Kreuzungsbereich. Dissertation. Institut für Informatik, Technische Universität München, Garching, 2010.
- [UIC 435-3] UIC, 435-3-9. Ausgabe: Gütenorm für einen europäischen EUR-Ladungsträger aus Stahl (EUR-Boxpalette) "Y" mit den Abmessungen 800 mm x 1200 mm, Union Internationale des Chemins de fer, Paris, 2008.
- [VDI 3586] VDI3586: Flurförderzeuge - Begriffe, Kurzzeichen, Beispiele, VDI Verband Deutscher Ingenieure, 2007.
- [Wei-2006] Weisweiler, S.; Sauerland, M.; Walch, D.; Hammerl, M.: Mitarbeiterqualifizierung und -mobilität: - Einflussfaktoren und Auswirkungen des flexiblen Mitarbeitereinsatzes im logistischem Umfeld. Forschungsarbeit. Lehrstuhl für Sozial- und Organisationspsychologie, Universität Regensburg, Regensburg, 2006.
- [Wic-2004] Wickens, C. D.; Gordon, S. E.; Liu, Y.: An introduction to human factors engineering. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2004.
- [Win-2012] Winner, H.: Handbuch Fahrerassistenzsysteme - Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort ; mit 45 Tabellen. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 2012.

- [Züh-2012] Zühlke, D.: Nutzergerechte Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen - Useware-Engineering für technische Systeme. Springer-Verlag, Heidelberg, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Methodisches Vorgehen	7
Abbildung 3-1:	Reality-Virtuality-Kontinuum (vgl. [Gün-2011] nach [Mil-1994])	12
Abbildung 3-2:	Komponenten eines AR-Systems	13
Abbildung 3-3:	Einteilung von Visualisierungsmedien (Quelle: [Bim-2005])	15
Abbildung 3-4:	Aufbau eines HUD im Automobil (Quelle: [Sch-2009])	17
Abbildung 3-5:	Methode des auf der Fahrbahn liegenden virtuellen Displays (Quelle: [Ber-2009])	18
Abbildung 3-6:	links: Segmentanzeige rechts: Anzeigeeinheit eines Gabelstaplers (Quelle: Jungheinrich AG)	19
Abbildung 3-7:	Anzeigeeinheit hinter dem Lenkrad (Quelle: Jungheinrich AG)	20
Abbildung 3-8:	Sichtfeld eines Staplerfahrers (Quelle: [BGH-2014])	22
Abbildung 4-1:	Analyse der Aufgaben eines Gabelstaplerfahrers	28
Abbildung 4-2:	Teilaufgaben der primären Fahraufgabe (Quelle: [Isr-2012])	29
Abbildung 4-3:	Aufgliederung der Hauptaufgabe Lasthandling in einem Einzelspiel	31
Abbildung 4-4:	LED-Anzeige in der Scheibenwurzel (Quelle: [Küh-2003])	36
Abbildung 4-5:	Die vier Elemente der Virtuellen Gabel	38
Abbildung 4-6:	Manuelle Regelung mit direkter sensorischer Kontrolle	43
Abbildung 4-7:	Manuelle Regelung mit indirekter sensorischer Kontrolle und die fünf Phasen der menschlichen Informationsaufnahme und -verarbeitung [Züh-2012]	44
Abbildung 5-1:	Geneigte und senkrechte Scheibe bei einem Head-up Display	47
Abbildung 5-2:	Projection Mapping (Quelle: Volkswagen)	49
Abbildung 5-3:	Emissive Projection Display (Quelle: Sun Innovations)	50
Abbildung 5-4:	Parallaxeneffekt - Der blaue Rahmen wird auf der Folie des EPD dargestellt. Für das linke und rechte Auge erscheint der Rahmen an einer anderen Position relativ zum Hintergrund.	51
Abbildung 5-5:	Technisches Gesamtkonzept der Virtuellen Gabel	52
Abbildung 5-6:	Tiefenbild der Kinect in einer Gabelstaplerkabine	53
Abbildung 5-7:	Kameraanbringungspunkt seitlich am Gabelträger	55
Abbildung 5-8:	Informationsfluss im geplanten Software-Konzept	56

Abbildung 6-1:	Sichtbereiche des Menschen: Sichtkegel des Menschen reflektiert auf der Schutzscheibe des Gabelstaplers ([1] foveal; [2] parafoveal; [3] peripher)	63
Abbildung 6-2:	CAD-Modell des eingesetzten Gabelstapler	65
Abbildung 6-3:	Darstellung der erstellten Lagerumgebung	66
Abbildung 6-4:	Extremtypologien der Manikins – von links nach rechts: Sehr kleine Frau (5. Perzentil) als Sitzzwerg und Sitzriese, sehr großer Mann (95. Perzentil) als Sitzzwerg und Sitzriese	67
Abbildung 6-5:	Positionierung des Manikins anhand definierter Körperpunkte	68
Abbildung 6-6:	Horizontale Anzeigeposition: Schnittkreise der Sichtkegel auf der Scheibe für den fovealen Sichtbereich in orange, für den parafovealen Bereich in weiß; links orientierte Kreise bei Fokussierung auf die linke Gabel und entsprechend für die rechts orientierten Kreise; Blaue Linie definiert die linke Abgrenzung für die Anzeige von Lasthandling-Symbolen; Grüne Linie definiert die linke Abgrenzung für die Anzeige von Warn- und Hinweissymbolen	69
Abbildung 6-7:	Vertikale Anzeigehöhe (Unterkante) bei Fokussierung auf den Mittelpunkt zwischen den beiden Gabeln, wobei sich die Gabel auf Bodenhöhe befindet; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien	70
Abbildung 6-8:	Vertikale Anzeigehöhe (Unterkante) bei Fokussierung auf den Mittelpunkt zwischen den beiden Gabeln, wobei sich die Gabel auf Höhe des Regalfach 1 befindet; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien	71
Abbildung 6-9:	Vertikale Anzeigehöhe bei Fokussierung auf Gabelmittenpunkt vor Regalfach 2; orange definiert die fovealen Sichtbereiche und weiß die parafovealen Sichtbereiche für die vier Extremanthropometrien	72
Abbildung 6-10:	Darstellung der Anzeigebereiche übertragen auf den Gabelstapler der Baureihe EFG 425-430 der Firma Jungheinrich (nicht maßstabsgetreu)	73
Abbildung 6-11:	Maximaler Abstand zwischen Augpunkt des 95. Perzentil Mann Sitzriese und einer Anzeige am unteren Scheibenbereich	75
Abbildung 6-12:	Zeichenhöhe ermittelt mit Ramsis kognitiv	77
Abbildung 6-13:	Mast muss zurückgeneigt werden, um in Senkrechtstellung zu gelangen. Entsprechende Anzeige in entgegengesetzter Richtung möglich.	82
Abbildung 6-14:	Bestätigung über senkrechten Mast mit zusätzlichen Gleichheitszeichen (Klammer)	82

Abbildung 6-15: Gabel muss nach oben in Regal B verschoben werden (Anzeige durch Pfeil nach oben)	83
Abbildung 6-16: Bestätigung über korrekte Hubhöhe über Anzeige des Gleichheitszeichens (Klammer)	83
Abbildung 6-17: Gabel muss nach links verschoben werden, um zentrale Position zu erlangen	84
Abbildung 6-18: Bestätigung über korrekte Seitenverschiebung über Anzeige des Gleichheitszeichens (Klammer)	84
Abbildung 6-19: Es muss in die Palette eingefahren werden. Entsprechende Darstellung ist vorhanden für Ausfahren mit Palette.	84
Abbildung 6-20: Bestätigung über korrekte Seitenverschiebung durch Entfernung des Pfeiles	84
Abbildung 6-21: Es muss geradeaus zum Lagerplatz 1-B-1 gefahren werden.	85
Abbildung 6-22: Es muss nach links zum Lagerplatz 1-B-1 abgelenkt werden.	85
Abbildung 6-23: Durchfahrtshöhe	86
Abbildung 6-24: Durchfahrtsbreite	86
Abbildung 6-25: Spurbreite	86
Abbildung 6-26: Hinderniswarnung (3x blinkend bei erstmaliger Anzeige) bei Fußgänger, FFZ	86
Abbildung 6-27: Systemwarnung (z.B. bei Betriebsstörung am Stapler)	86
Abbildung 7-1: Demonstrator - Gabelstapler mit integriertem AR-System	90
Abbildung 7-2: Trackingsystem Staplerauge	91
Abbildung 7-3: Regalmarker und Palettenmarker (Palette auf Stellplatz 2-C-2)	93
Abbildung 7-4: Bild der um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedrehten Kamera	93
Abbildung 7-5: Palette mit Marker	94
Abbildung 7-6: Informationsfluss zwischen den Software-Modulen	96
Abbildung 7-7: verwendeter Laserprojektor (Quelle: Kvant)	98
Abbildung 7-8: Hubhöhenanzeige 1: Durch eine Darstellung der korrekten Regalebene (B) des anzufahrenden Lagerplatzes und eines Pfeils wird der Fahrer beim Einstellen der Hubhöhe unterstützt	100
Abbildung 7-9: Hubhöhenanzeige 2: Anzeige aus Fahrersicht	101
Abbildung 7-10: Navigation zum Lagerplatz 1-B-1	102
Abbildung 7-11: Funktionsweise der Strahlablenkung eines Laserprojektors	104
Abbildung 8-1: Draufsicht auf die Versuchsstrecke mit Kennzeichnung der Aufgabenbearbeitung sowie der Hindernisse, blau: Hindernisse, rot: Regale	108
Abbildung 8-2: Hindernisse im Parcours	108

Abbildung 8-3:	Demonstrator mit optischen, sensorbasierten Messsystem (Quadrate) zum Tracken von Markern sowie der Anbringung der GoPro Hero 2 zur Videoaufzeichnung (Kreis)	109
Abbildung 8-4:	Häufigkeitsverteilung der Nutzung eines Gabelstaplers	112
Abbildung 8-5:	Gesamtbearbeitungsdauern [s] in den einzelnen Messfahrten [$\alpha=5\%$]	113
Abbildung 8-6:	Dauer der Aufgabenbearbeitung [s] bei Aufgabe 1 zur Auslagerung (beinhaltet Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie der Auslagerung) [$\alpha=5\%$]	114
Abbildung 8-7:	Aufgabenbearbeitungsdauer [s] zum Auslagerungsprozess bei Aufgabe 2 (beinhaltet Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie der Auslagerung) [$\alpha=5\%$]	115
Abbildung 8-8:	Bearbeitungsdauer [s] für den Einlagerungsprozess bei Aufgabe 1 (bezieht sich auf Einstellung der Mastneigung, Hubhöhe, Seitenverschiebung sowie Einlagerung der Palette) [$\alpha=5\%$]	116
Abbildung 8-9:	Ergebnisse zur Genauigkeit in der Aufgabenbearbeitung bei der Zusatzaufgabe	117
Abbildung 8-10:	Ergebnisse zur subjektiven Beanspruchung während den Versuchsfahrten	118
Abbildung 8-11:	Ergebnisse zur Gebrauchstauglichkeit (Usability) der verschiedenen Anzeigeconzepte	118
Abbildung 8-12:	Die Usability der Anzeige allgemein wird laut [Ban-2009] als „gut“ eingestuft.	119
Abbildung 8-13:	Ergebnisse zur Bearbeitungsdauer bei unterschiedlichen Toleranzgrenzen bei der Bedingung „mit Reihenfolge“	122
Abbildung 8-14:	Ergebnisse zur Bearbeitungsdauer bei unterschiedlichen Toleranzgrenzen bei der Bedingung „ohne Reihenfolge“	122
Abbildung 8-15:	Vergleich der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 im Haupt- und Nachversuch für die Bedingungen „mit Reihenfolge“ mit Unterteilung der unterschiedlichen Toleranzklassen: Die ausgefüllten Balken stellen die Werte der Nachstudie dar, während die transparenten Balken die Werte der Hauptstudie widerspiegeln.	123
Abbildung 8-16:	Vergleich der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 im Haupt- und Nachversuch für die Bedingungen „ohne Reihenfolge“ mit Unterteilung der unterschiedlichen Toleranzklassen: Die ausgefüllten Balken stellen die Werte der Nachstudie dar, während die transparenten Balken die Werte der Hauptstudie widerspiegeln.	124

- Abbildung D-9-1: Untersuchung der Mastneigung 1 hinsichtlich signifikantem Unterschied bei der Bedingung „mit Reihenfolge“ und „ohne Reihenfolge“ D-1
- Abbildung D-9-2: Untersuchung der Hubhöhe 1 hinsichtlich signifikantem Unterschied bei der Bedingung „mit Reihenfolge“ und „ohne Reihenfolge“ D-1

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Assistenztyp und charakteristische Eigenschaften von Assistenzfunktionen nach Kraiss [Kra-1998]	24
Tabelle 3-2:	Assistenzsysteme in Gabelstaplern	26
Tabelle 4-1:	Bewertung der Einsatzszenarien	41
Tabelle 6-1:	Positionen der Anzeigebereiche	74
Tabelle 6-2:	Zeichenhöhe nach [DIN EN ISO 15008]	76
Tabelle 6-3:	Vorzugsgrößen für Sicherheitszeichen nach ASR A1.3 [Bun-2007]	78
Tabelle 6-4:	Eignung von Symbol- und Hintergrundfarben nach [DIN EN ISO 15008]	80
Tabelle 7-1:	Technische Daten des verwendeten Gabelstaplers	89
Tabelle 7-2:	Technischen Daten der Kamera des Trackingsystems Staplerauge [Gün-2014a]	91
Tabelle 7-3:	Technische Daten der Kamera des Trackingsystems Metaio	92
Tabelle 7-4:	Technischen Daten der Folie	98
Tabelle 7-5:	Technische Daten des Laserprojektors	99
Tabelle 8-1:	Statistische Auswertung des Vergleichs der Gesamtbearbeitungsdauern der Versuchsfahrten auf Unterschied	113
Tabelle 8-2:	Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 1 aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied	114
Tabelle 8-3:	Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Auslagerungsprozess 2 aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied	115
Tabelle 8-4:	Statistische Auswertung des Vergleichs der Bearbeitungsdauern für den Einlagerungsprozess aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied	115
Tabelle 8-5:	Toleranzgrenzen des Systems im Hauptversuch	116
Tabelle 8-6:	Statistische Auswertung des Vergleichs der OWI-Werte aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied	117
Tabelle 8-7:	Statistische Auswertung des Vergleichs der OWI-Werte aus den einzelnen Versuchsfahrten auf Unterschied	119
Tabelle 8-8:	Toleranzgrenzen des Systems im Hauptversuch sowie im Nachversuch	120
		143

Anhang A Aufgabenanalyse

Aufgabenanalyse eines Gabelstaplerfahrers, Gliederungskriterium "Verrichtung"				Überwachung	Planen	Bedienung/ Steuerung	Regelung	
Hauptaufgabe	Teilaufgabe	Elementaraufgaben	Parameter					
Fahraufgabe	Navigation	Wahl der Fahrroute			x			
		Planung der Fahrroute unter Einbeziehung von:						
		Position von Quelle und Senke						
		Einsatzbereich			x			
		Maße und Gewicht von Stapler und Last						
	Breite und Tragfähigkeit der Wege							
	Verkehrsregeln							
	Führung	Umsetzung der gewünschten Fahrroute				x		
		Vorwärts- bzw. Rückwärtsfahrt (Geradeaus- bzw. Kurvenfahrt)					x	
		Ableitung der Führungsgrößen (Sollspur, Sollgeschwindigkeit)					x	
		Kontrolle des Fahrkorridors nach Hindernissen						
		Fußgänger			x			
		Flurförderzeuge und weitere Fahrzeuge						
		Gegenstände						
		Engstellen						
Kreuzungen								
Durchfahrtshöhen								
Kontrolle des Fahrkorridors nach Tragfähigkeit				x				
Kontrolle des Fahrkorridors nach Beschilderung				x				
Reaktion auf Hindernisse, Beschilderung					x			
Stabilisierung	Kontrolle des Längs- und Seitenabstands			x				
	Kontrolle der Fahrgeschwindigkeit			x				
	Regelung durch Stelleingriffe auf die Führungsgrößen (Sollspur, Sollgeschwindigkeit)							
	Beschleunigen							
	Bremsen						x	
Lenken								
Betrieb	Kontrolle der Betriebszustände			x				
	Kontrolle der Warnmeldungen			x				
	Bedienung Beleuchtung und Scheibenwischer					x		
	Bedienung Authentifizierungssystem					x		
	Bedienung Rückhaltesysteme					x		
Auftragsabwicklung	Bedienung Komfortfunktionen (Heizung, Klima, Radio, usw.)					x		
	Batterie laden/Treibstoff auffüllen					x		
	Einholen des Auftrags					x		
	Bestätigung der Auftragsannahme					x		
	Identifikation der Last (Scannen, RFID, manuelle Eingabe, usw.)					x		
Quittierung des Auftrags					x			
Lasthandling	Anfahrt Quelle	Senkrechte Anfahrt der Last (Fahraufgabe)					x	
		Überprüfung des Lastzustands		x				
		Überprüfung des Gewichts und Schwerpunkt der Last		x				
		Überprüfung der Tragfähigkeit des FFZ		x				
	Lastaufnahme	Einstellung der Mastneigung auf senkrecht						x
		Einstellung der Hubhöhe entsprechend Lastposition						x
		Einstellung der Seitenverschiebung						x
		Einstellung des Zinkenabstands						x
		bei Ladehilfsmitteln mit variierenden Aufnahmepunkten						x
		Gerades Eintauchen in Last (Fahraufgabe):						x
	Beachtung Aufnahme möglichst nahe am Gabelrücken							
	Kontrolle der Last beim Eintauchen			x				
	Einstellung der Hubhöhe nach oben zum Freiheben der Last						x	
	Abfahrt Quelle	Gerade Rückwärtsfahrt (Fahraufgabe) aus Quelle						x
		Kontrolle der Last bei Rückwärtsfahrt			x			
		Einstellung der Hubhöhe nach unten in Transportstellung (bodenfrei)						x
	Einstellung der Mastneigung nach hinten in Transportstellung						x	
	Lasttransport	Fahraufgabe mit Last						x
		Rückwärtsfahrt	veränderte physikalische Eigenschaften wegen Last					
			Sichteinschränkung bei hoher Last					x
			Befahren von Gefällen und Steigungen					
		Kontrolle der Last			x			
		Vermeidung von Verrutschen der Last						
	Beachtung Bodenbeschaffenheit			x				
	Vermeidung abrupter Fahrmanöver				x			
	Überprüfung der Tragfähigkeit des Untergrunds aufgrund erhöhtem Gesamtgewichts			x				
	Anfahrt Senke	Senkrechte Anfahrt der Senke (Fahraufgabe)						x
Überprüfung des Zustand der Senke				x				
Überprüfung der Tragfähigkeit der Senke				x				
Lastablage	Einstellung der Mastneigung auf senkrecht						x	
	Einstellung der Hubhöhe entsprechend Senke						x	
	Einstellung der Seitenverschiebung						x	
	Gerade Einfahrt über Senke (Fahraufgabe)						x	
	Kontrolle der Last beim Einfahren			x				
	Einstellung der Hubhöhe nach unten zum Absetzen der Last						x	
Beachtung exaktes Absetzen falls Stapeln						x		
Kontrolle der Last beim Absetzen						x		
Abfahrt Senke	Gerade Rückwärtsfahrt aus Last (Fahraufgabe)						x	
	Kontrolle der Last beim Rausfahren aus Ladehilfsmittel			x				
	Einstellung der Hubhöhe in Leerfahrtstellung (bodenfrei)						x	
	Einstellung der Mastneigung in Leerfahrtstellung						x	

Anhang B Lastenheft

1. Hardware				
1.1. Visualisierungsmedium				
1.1.1.	Position des Displays	im Sichtfeld Palettenstellplatz	M	Die Information muss im Sichtfeld auf den Palettenstellplatz sein.
1.1.7.	Sichtfeld	keine Verdeckung	M	Das Display wird im industriellen Umfeld eingesetzt. Aus Sicht der Arbeitssicherheit darf die Sicht des Arbeiters nicht eingeschränkt werden, um mögliche Arbeitsunfälle zu vermeiden.
1.1.3.	FoV	Hor.: 50 cm Vert.: Regalhöhe	S	Entsprechend Sichtfeld auf die Palette: Hor.: Hälfte Palettenstellplatz, Vert.: Boden - Regalhöhe. Bsp.: 2 m Abstand zum Regal, Regalhöhe 5m -> vert. FOV: 102,6°
1.1.4.	Auflösung	abhängig Zeichengröße	M	empfohlene Zeichengröße laut DIN EN ISO 15008
1.1.5.	Bildwiederholffrequenz	mind. 60 Hz	M	Die Bildwiederholffrequenz ist wichtig, wie angenehm der Mensch das Bild findet. Bei zu niedriger Frequenz ruckelt das Bild und dies ist auf Dauer störend.
1.1.6.	Helligkeit	verstellbar	M	Die Umweltbedingungen können im industriellen Umfang schwanken, deshalb soll sich die Helligkeit des Displays daran anpassen lassen bzw. sich automatisch daran anpassen. Beleuchtungsstärke laut Arbeitsstättenrichtlinie: Lagerräume für gleichartiges oder größtenteils Lagergut: 50 lx
1.1.7.	Displayfarben	farbig	S	Farben sind ein wichtiges Gestaltungsmerkmal (z.B. rot für wichtige Elemente).
1.1.8.	Gewicht	Am Gabelstapler keine Vorgabe. Falls HMD: < 200 g	M	Für Installation am Gabelstapler keine Einschränkung, da Gabelstapler vielfaches wiegt. Da das HMD vom Fahrer über den ganzen Tag getragen wird, ist ein niedriges Gewicht eine Grundvoraussetzung, um gesundheitlichen Folgen vorzubeugen.
1.1.9.	mit Brille benutzbar	ja	M	Das Visualisierungsmedium muss auch für Brillenträger ohne Einschränkungen benutzbar sein.
1.1.10.	Arbeitssicherheit	gewährleisten	M	Da es im industriellen Umfeld eingesetzt wird, darf es die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter nicht gefährden, z.B. dürfen keine Kabel abstehen, die sich irgendwo verhaken können.
1.1.11.	Robustheit	hoch	M	Für den industriellen Einsatz sollte das Gerät möglichst robust gebaut sein. Vibrationen am Stapler und Staubansammlungen in Lagerhallen sollten berücksichtigt werden.
1.1.12.	Kosten	max. 7.000 €	M	Die Brille darf zusammen mit der Kamera laut Antrag 7.000€ kosten
1.1.13.	Schalter	vorhanden	M	Das Visualisierungsmedium muss vom Benutzer jederzeit ein- und ausschaltbar sein.
1.1.14.	Kalibrierung	so wenig wie möglich	M	Das System muss, v.a. wenn auf Tracking zugegriffen wird, kalibriert werden. Dies soll so wenig wie möglich geschehen.
1.2. mobiler PC				
1.2.1.	Abmaße	Notebookgröße	M	Der PC soll in die Staplerkabine integriert werden, ohne den Aktionsradius und das Sichtfeld des Fahrers einzuschränken.
1.2.2.	Leistung	Mehrkern-Prozessor	M	Hängt davon ab, welche Anwendungen darauf laufen (gesamtes Tracking, Sensorfunktion, Visualisierung, Videoverarbeitung,...). Mehrkernprozessoren für die parallele Bearbeitung zweier Trackings.
1.2.3.	RAM-Speicher	>= 4GB	S	Hängt davon ab, welche Anwendungen darauf laufen (gesamtes Tracking, Sensorfunktion, Visualisierung, Videoverarbeitung,...). Ein Zwischenspeicher ist wichtig, da das Gerät auch teilweise off-line laufen und somit Funklöchern vorbeugen kann und das Netz nicht zu sehr beansprucht wird.
1.2.4.	Ausfallsicherheit	< 99%	M	Wenn keine Notfalloption (z.B. Papierliste) integriert ist, sollte diese bei 100% liegen.
1.2.5.	Stromversorgung	gewährleisten	M	Abgriff der Energie vom Gabelstapler-Akku. Spannungsschwankungen bei ruckartigen Hubvorgängen beachten.
1.2.6.	Robustheit	hoch	M	Für den industriellen Einsatz sollte das Gerät möglichst robust gebaut sein. Vibrationen am Stapler und Staubansammlungen in Lagerhallen sollten berücksichtigt werden.
1.2.7.	Arbeitssicherheit	gewährleisten	M	Da er im industriellen Umfeld eingesetzt wird, darf er die Arbeitssicherheit der Mitarbeiter nicht gefährden. Es soll keine nach außen stehenden Kabel geben. Am besten wird das Gerät in die Arbeitskleidung integriert.

B Lastenheft

1.3. Tracking				
1.3.1.	Genauigkeit	präzise	M	Das Tracking muss so genau sein, dass der Fahrer die Gabelzinken fehlerfrei in die Palette eintauchen kann. Die Neigungsmessung muss so genau erfolgen, dass die Gabelzinken exakt waagrecht gesetzt werden können.
1.3.2.	Robustheit	störungsfrei	M	Es soll robust gegenüber allen Umwelteinflüssen im Lager sein (z.B. Lichtverhältnisse, Verschmutzung).
1.3.3.	Geschwindigkeit	in Echtzeit	M	Schnelle Gabelbewegungen dürfen das Tracking nicht unterbrechen.
1.4. Kameras				
1.4.1.	Auflösung	1 Mpixel	M	Die Auflösung der Kamera muss so hoch sein, dass das Tracking präzise umzusetzen ist.
1.4.3.	Fokus	einstellbar	M	Für Tracking Palette/Stellplatz: optimiert für Distanzen < 2 m (Abstand Stapler - Regal beim Lasthandling)
1.4.4.	Lichtstärke	hoch	M	Mit einer hohen Lichtstärke kann die Belichtungszeit so minimiert werden, dass ein schnelles Tracking sichergestellt werden kann.
1.4.5.	Verkabelung	Gesamtstrecke Hub	M	Die Verkabelung der Kamera am Seitenschieber muss auf die gesamte Hubhöhe ausgelegt sein und die Bewegung des Hubgerüsts mitfahren.
1.4.6.	Robustheit	störungsfrei	M	Für den industriellen Einsatz sollte das Gerät möglichst robust gebaut sein. Vibrationen am Stapler und Staubansammlungen in Lagerhallen sollten berücksichtigt werden.
1.5. Kommunikation				
1.5.1.	Schnittstelle Visualisierungsmedium	Standard	S	Für eine vereinfachte Anbindung sollten bewährte Standards benutzt werden: VGA, HDMI, ...
1.5.2.	Schnittstelle Kamera	Standard	S	Für eine vereinfachte Anbindung sollten bewährte Standards benutzt werden: USB, Ethernet, ...
1.5.3.	Schnittstelle SLS	WLAN	M	Die Verbindung zum Staplerleitsystem muss kabellos umgesetzt werden.
1.6. Stromversorgung				
1.6.1.	Gleichstrom	Spannungswandler	M	Für die Stromversorgung von benötigten Komponenten (Netzwerk-, USB- Switch)
1.6.2.	Wechselstrom	Echt-Sinus-Wechselrichter	M	Für die Stromversorgung von Rechnern, Laptop.
1.6.3.	Robustheit	störungsfrei	M	Vor allem Bordnetzschwankungen bei plötzlichen Hubbewegungen sind zu beachten. Stabilisierte Stromversorgung.
1.7. Datenbordnetz - CAN, Diagnose				
1.7.1.	Datenabruf	vorhanden	M	Für die Erfassung von Bedienvorgängen und Betriebszuständen ist ein Abruf der Bordnetzdaten notwendig: CAN, Diagnose, ...
2. Software				
2.1. Visualisierung				
2.1.1.	Berechnung Position virtuelle Information	im Sichtfeld Palettenstellplatz	M	Die Position der Darstellung muss entsprechend der Gabelposition adaptiert werden.
2.1.7.	Visualisierungsmedium	mehrere	S	Die SW soll mehrere und auch unterschiedliche Visualisierungsmedien ansprechen können.
2.2. Interaktion				
2.2.5.	Reaktionszeiten	< 70ms	M	Damit der Staplerfahrer keine lästigen Wartezeiten (= Totzeiten) bei der Bedienung/Regelung hat, sollte die Rückführung auf Bedienvorgänge so schnell wie möglich kommen.
2.2.6.	Rückmeldung	auf jede Aktion	M	Der Staplerfahrer muss auf jede seiner Aktionen eine eindeutige Rückmeldung bekommen.
2.3. Kommunikation				
2.3.1.	Datenprotokoll SLS	TCP / IP	M	Auch beim Übertragungsprotokoll soll auf Standardtechnologien zurückgegriffen werden. In der fml-Halle ist dies TCP / IP.
	Datenprotokoll zwischen SW-Modulen	Standard	M	Die einzelnen SW-Module sollen über Standardprotokolle, wie z. B. TCP, UDP oder MQTT Daten austauschen.
2.3.2.	Verschlüsselung der Daten	nicht notwendig	S	
2.4. Softwareaufbau				
2.4.2.	Schnittstellen		M	Es soll eine einfache Integration neuer Module, z.B. Interaktionsgeräte bzw. Austausch der Standardmodule, z. B. Tracking oder Visualisierung möglich sein. Außerdem wird das System bei Partnern in der Praxis getestet und soll daher leicht in deren Infrastruktur integriert werden können.
2.4.3.	modularer Aufbau	ja	M	Da bei dem System Komponenten häufig getauscht werden, z.B. Trackingmodul, ist es wichtig, dass diese für sich selber stehen und leicht in das Gesamtsystem integrierbar sind.
2.4.4.	Erweiterungsfähigkeit	ja	M	Das System wird nach und nach um Funktionalitäten erweitert. Die Schnittstellen und der modulare Aufbau unterstützen dies. Der Anschluss mehrerer Clients sollte möglich sein.

2.5. Funktionalitäten				
2.5.1.	Installierbarkeit	einfach	M	Das System soll einfach zu installieren sein. Dafür sollen Standardrechner mit Standardbetriebssystemen ausreichen. Die Installation soll schnell gehen und auch für Laien nachvollziehbar sein.
2.5.3.	Fehlermanagement	vorhanden	S	Ein Ausfall eines Moduls SW und HW-Moduls muss erkannt werden und kommuniziert werden.
2.5.4.	Funktionsumfang	leicht erweiterbar	M	da das System nach und nach aufgebaut und um Funktionen erweitert wird, soll sich der Funktionsumfang ohne Probleme erweitern lassen.
2.6. Anbindung an ein SLS				
2.6.1.	Integration SLS	ja	M	Da ein möglichst praxisnaher Demonstrator entstehen soll, soll er eine Anbindung an ein SLS enthalten. Diese Anbindung soll möglichst standardisiert sein.
2.6.2.	Datenaustausch	in Echtzeit	M	Dem Staplerfahrer sollen immer die aktuellen Daten zur Verfügung stehen (online Datenübermittlung).
2.6.3.	Datenformat	XML	M	Der Datenaustausch soll in einem einfachen und standardisierten Format vor sich gehen; XML ist dafür eine gute Lösung.
2.6.4.	Anzahl Kommissionierer	1 (10-20)	M	Für den Testaufbau soll ein Staplerfahrer = Client angebunden werden. Für die Praxistests muss das System aber mit mehreren gleichzeitig arbeiten können.
2.7. Tracking				
2.7.1.	Integration in System	leicht	M	Da verschiedene Trackingverfahren getestet werden können, sollten diese einfach in das Gesamtsystem integriert werden können.
2.7.2.	Sensorfusion	möglich	M	Da verschiedene Trackingverfahren gleichzeitig im Einsatz sein können (Nah- und Ferntracking oder zusätzlicher Inertialsensor) soll die Daten einfach fusionieren können.
2.7.3.	SDK	vorhanden	M	Die Tracking-SW soll ein Software-Entwicklungs-Kit bereitstellen, damit problemspezifische Software entwickelt werden kann.
2.7.4.	Kosten	0 €	M	Für das Tracking wurden keine Gelder beantragt.
3. Lasthandling - Virtuelle Gabel				
3.1.1.	Anzeige Virtuelle Gabel	abhängig Bedienvorgang	M	Abhängig des Bedienvorganges wird auf die Anzeigen der Virtuellen Gabel I - IV geschaltet.
3.1.2.	Priorisierung der Anzeige	möglich	M	Bei parallelen Bedienvorgängen muss priorisiert werden, welche Anzeige der Virtuellen Gabel I - IV aktiviert wird.
3.1.3.	Aktivierung Virtuelle Gabel	vor Lagerplatz	M	Das System soll automatisch die Anzeige der Virtuellen Gabel aktivieren, wenn sich der Gabelstapler in einer Entfernung < 2 m vor einem Palettenstellplatz befindet.
4. Mitarbeiterakzeptanz				
4.1.	Bedienung	intuitiv	M	Ein Muss für den Erfolg des Systems (schnelle Erlernbarkeit und Akzeptanz).
4.2.	Nützlichkeit	sichtbar	M	Die Mitarbeiter auf Nützlichkeit hinweisen. Die neue Technologie bringt Vorteile (z.B. Zeitersparnis und damit mehr Lohn).
4.3.	Unterstützung bei Bedienung	vorhanden	M	Der Mitarbeiter soll sofort wissen, an wen er sich bei Fragen zu wenden hat (Ansprechpartner oder Bedienungsanleitung).
4.5.	Gefühl der Beherrschung	vorhanden	M	Der Mitarbeiter soll stets das Gefühl haben, dass er das System beherrscht.
4.8.	Schulung und Training	nötig	M	Die Einlernzeit soll zwar kurz sein, aber auch so lange, dass die Mitarbeiter einen sicheren Umgang mit dem System beherrschen.
4.9.	Einarbeitungszeit	gewähren	M	Die Mitarbeiter sollen auch nach der Schulung sich langsam mit dem System einarbeiten (niedrigere Leistungsanforderungen).
4.10.	Alter der Mitarbeiter	einbeziehen	S	Die Akzeptanz von neuen Technologien ist in den unterschiedlichen Altersschichten verschieden.
5. Allgemeines				
5.1.	Implementierungsphase	1-2 Wochen	S	Die Implementierungsphase spielt bei den Funktionsmustern keine Rolle, aber später ist dies ein sehr wichtiger Punkt; auch für die Praxistests ist es wichtig, dass das System schnell integriert werden kann.
5.3.	Temperaturbereich	-15-50°C	S	Ein Einsatz in Tiefkühlagern ist denkbar.

Anhang C Hauptstudie Fragebögen



Technische Universität München



Lehrstuhl für Ergonomie

**Evaluation des Demonstrators
im Rahmen des Projektes
„Augmented Reality im Flurförderzeug“**



Geheimhaltungserklärung

Die in der Usability Studie im Rahmen des Projekts „AR im FFZ“ behandelten Inhalte sind streng vertraulich und unterliegen der Geheimhaltungspflicht. Der Proband verpflichtet sich, vertrauliche Informationen in Bezug auf die Studie streng geheim zu halten und sie Dritten gegenüber nicht zu offenbaren.

Vertrauliche Informationen sind jegliche Unterlagen, Daten, Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse und technisches Wissen, welche dem Probanden direkt oder indirekt im Zuge der bevorstehenden Studie oder auf sonstige Weise zugänglich gemacht werden. Dabei ist es gleichgültig in welcher Form dies geschieht. Davon ausgenommen sind Unterlagen, Daten und technisches Wissen, welche zum Zeitpunkt der Zugänglichmachung bereits öffentlich bekannt waren.

Hiermit erkläre ich, meine Geheimhaltungspflicht einzuhalten.

Datum

Unterschrift

Einverständniserklärung

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich freiwillig an der Studie im Rahmen des Projekts „AR im FFZ“ am Lehrstuhl fml teilnehme. Den Anweisungen der Versuchsleiter und Sicherheitsbeauftragten folge ich im Interesse meiner eigenen Sicherheit jederzeit.

Zudem erkläre ich mich mit meiner Unterschrift einverstanden, dass zur Auswertung des Versuchs Videodaten erhoben werden, auf denen ich erkennbar bin. Diese Daten werden ausschließlich zur Auswertung des Versuchs erhoben und **nie** an Dritte weitergegeben. Des Weiteren werden diese Daten, wie alle anderen auch, **anonym** erhoben.

Datum

Unterschrift

Datum: _____

VP: _____

Demographischer Fragebogen

Geschlecht:	<input type="checkbox"/> männlich	<input type="checkbox"/> weiblich	Alter:	
Beruf:			Staplerschein seit (Jahr):	
Sehhilfe:	<input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Brille <input type="checkbox"/> Kontaktlinsen			
Farbfehlsichtigkeit	<input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> rot/grün <input type="checkbox"/> blau/gelb <input type="checkbox"/> Sonstige: _____ Sehr stark <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> Sehr schwach			
Ich führe einen Gabelstapler:	<input type="checkbox"/> nicht regelmäßig, seltener als einmal pro Jahr <input type="checkbox"/> nicht regelmäßig, aber mehrmals pro Jahr <input type="checkbox"/> mehrmals pro Monat <input type="checkbox"/> ca. einmal pro Woche <input type="checkbox"/> mehrmals pro Woche			
Erfahrung mit Gabelstapler	<p>Wie viel Erfahrung haben Sie mit folgenden Funktionen eines Gabelstaplers?</p> <p style="text-align: center;">keine sehr viel</p> <p>Mastneigung </p> <p>Höhenverschiebung der Gabel </p> <p>Seitenverschiebung der Gabel </p> <p>Eintauchtiefe der Gabel </p> <p>Mit welchen Systemen oder anderen Funktionen haben Sie bereits Erfahrung? (z.B. Sonderfunktionen/Hersteller/etc.)</p>			

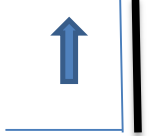
Datum: _____

VP: _____

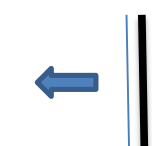
Überprüfung der Symbolik

Bitte bewerten Sie die folgenden Symbole hinsichtlich ihrer Information, ihrer Darstellung, ihrer Komplexität und dem Zusammenhang zur Realität:

„Dieses Symbol gibt die aktuelle vertikale Position der Gabel sowie die Richtung zur Höhenverschiebung an.“

	Verstandene Information:		
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Kommentar:			

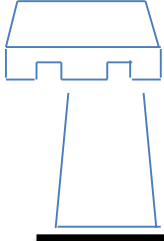
„Dieses Symbol gibt sie Soll-Position der Gabel in horizontaler Richtung bzw. die auszuführende Tätigkeit in horizontaler Richtung an.“

	Verstandene Information:		
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Kommentar:			


Datum: _____

VP: _____

„Dieses Symbol gibt aktuelle seitliche Position der Gabel an“

	Verstandene Information:	
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Kommentar:		

„Dieses Symbol gibt die aktuelle Neigung des Mastes an.“

	Verstandene Information:	
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Kommentar:		

„Diese Kombination gibt die Position des Objekts im Lager an.“


<p style="text-align: center;">2 – C - 1</p>	Verstandene Information:	
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Kommentar:		

Datum: _____

VP: _____








Navigation

Bitte bewerten Sie die Navigation hinsichtlich ihrer Information, ihrer Darstellung, ihrer Komplexität und dem Zusammenhang zur Realität:

	Ziel wurde problemlos gefunden:	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Darstellung eindeutig	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Darstellung komplex	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
	Zusammenhang zur Realität vorhanden	<input type="checkbox"/> ja	<input type="checkbox"/> nein
Kommentar:			

Warnsymbole

Welche der folgenden Warnhinweise hat Ihnen das System angezeigt?

						
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Waren alle Warnsymbole für Sie eindeutig?						<input type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein
Wenn „nein“, was war unklar?						



Technische Universität München



Lehrstuhl für Ergonomie

Datum: _____

VP: _____

NASA-TLX – Deutsche Übersetzung nach [Sei-2003]

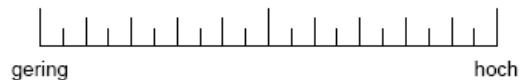
Geben Sie jetzt bitte an, wie hoch die Beanspruchung in den einzelnen Dimensionen war. Markieren sie dazu auf den folgenden Skalen bitte, in welchem Maße Sie sich in den sechs genannten Dimensionen von der Aufgabe beansprucht oder gefordert gesehen haben:

Beispiel:



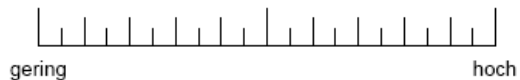
Geistige Anforderungen

Wie viel geistige Anstrengung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehlertolerant?



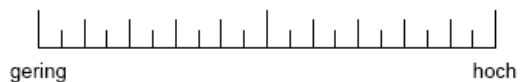
Körperliche Anforderungen

Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?



Zeitliche Anforderungen

Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Abfolge langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?



Ausführung der Aufgaben

Wie erfolgreich haben Sie ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?



Anstrengung

Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?



Frustration

Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?





Technische Universität München



Lehrstuhl für Ergonomie

Datum: _____

VP: _____

SUS-Fragebogen

	Stimme gar nicht zu				Stimme voll zu
1. Ich denke, ich würde dieses Programm gerne häufiger benutzen.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
2. Ich fand das Programm unnötig komplex.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
3. Ich fand, das Programm ist einfach zu benutzen.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
4. Ich denke, ich würde die Unterstützung einer erfahreneren Person brauchen, um in der Lage zu sein, das Programm zu benutzen.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem Programm sind gut integriert.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
6. Ich fand, es gibt zu viele Inkonsistenzen in diesem Programm.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
7. Ich könnte mir vorstellen, dass die meisten Leute sehr schnell lernen würden mit diesem Programm umzugehen.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
8. Ich fand das Programm sehr schwerfällig im Gebrauch.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
9. Ich fühlte mich sehr sicher bei der Benutzung des Programmes.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich mit diesem Programm zurechtkam.	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5



Technische Universität München



Lehrstuhl für Ergonomie

Datum: _____

VP: _____

Abschlussinterview

Bitte bewerten Sie die folgenden Aussagen hinsichtlich ihrer Richtigkeit auf einer Skala von 1 bis 5. Dabei gilt:

- 1 – „trifft überhaupt nicht zu“
- 2 – „trifft weniger zu“
- 3 – „trifft bedingt zu“
- 4 – „trifft ziemlich zu“
- 5 – „trifft voll zu“

	Stimme gar nicht zu				Stimme voll zu
1. Das System hat mich bei den auszuführenden Tätigkeiten unterstützt	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
2. Das System war ein hilfreiches Zusatztool	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
3. Das System gab mir mehr Sicherheit	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
4. Das System eignet sich für Anfänger und Experten gleichermaßen	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
5. Ich habe mich voll auf das System verlassen	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
6. Ich habe eher auf die eigenen Fähigkeiten vertraut	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
7. Das System hat mich von meiner wesentlichen Aufgabe abgelenkt	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5
8. Das System hat mich verwirrt und aufgehalten	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5



Technische Universität München



Lehrstuhl für Ergonomie

Datum: _____

VP: _____

Allgemeine Bemerkungen

positiv

negativ

Anhang D Hauptstudie Evaluation Ergebnisse

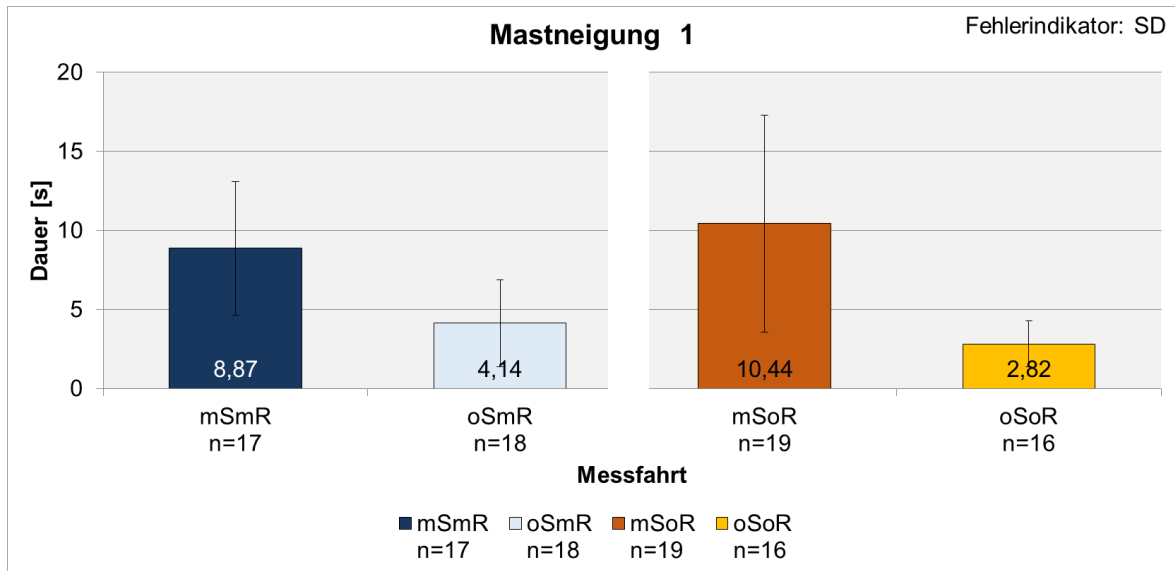


Abbildung D-9-1: Untersuchung der Mastneigung 1 hinsichtlich signifikantem Unterschied bei der Bedingung „mit Reihenfolge“ und „ohne Reihenfolge“

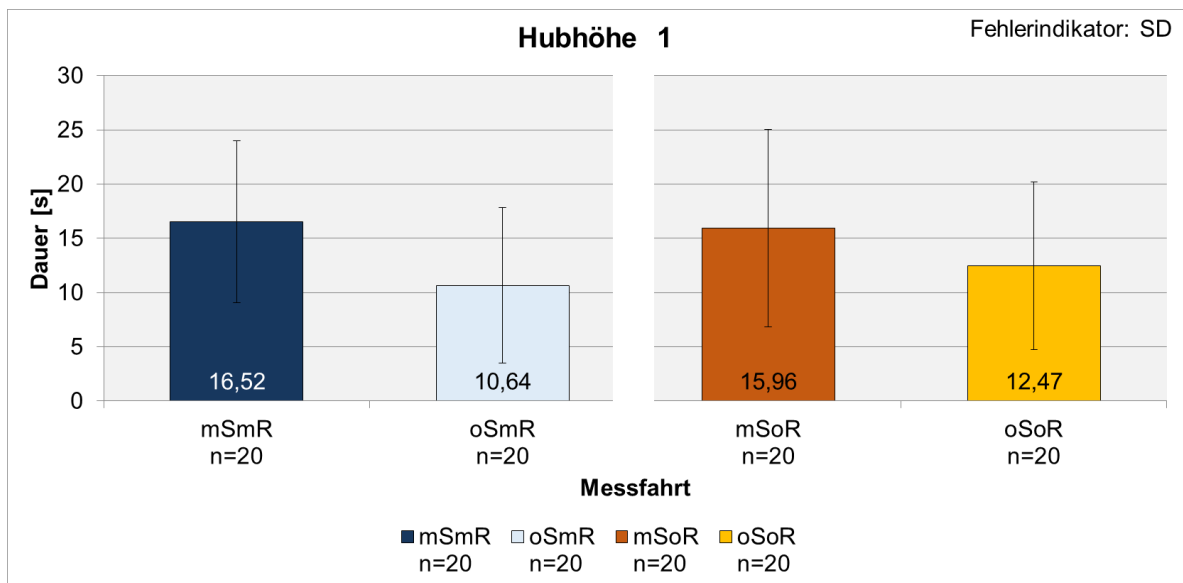


Abbildung D-9-2: Untersuchung der Hubhöhe 1 hinsichtlich signifikantem Unterschied bei der Bedingung „mit Reihenfolge“ und „ohne Reihenfolge“